



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

**DIAGNOSTIKA VYSOKONAPĚŤOVÝCH KONDENZÁTORŮ
PRO KASKÁDNÍ NAPĚŤOVÝ NÁSOBIČ**

DIAGNOSIS OF HIGH VOLTAGE CAPACITORS FOR CASCADE VOLTAGE MULTIPLIER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Dmitriy Baev

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Krbal, Ph.D.

BRNO 2017



Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektrotechnická výroba a materiálové inženýrství**

Ústav elektrotechnologie

Student: Bc. Dmitriy Baev

ID: 171459

Ročník: 2

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Diagnostika vysokonapěťových kondenzátorů pro kaskádní napěťový násobič

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s diagnostikou vysokonapěťových komponentů pomocí laboratorního měření na elektronickém můstku a s pomocí systému měření částečných výbojů. Zaměřte se především na použité přesné metody používající pulsní diskriminaci. Pro účel laboratorního měření navrhnete vhodné uspořádání elektrod, které eliminuje vliv korony. Získaná data z měření analyzujte a určete úroveň kvality, případně nastalé degradace měřených kondenzátorů. Výsledkem práce by měl být návrh rychlé metodiky pro nalezení nekvalitních kondenzátorů za účelem zvýšení spolehlivosti napěťového násobiče.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle doporučení vedoucího práce.

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 25.5.2017

Vedoucí práce: Ing. Michal Krbal, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT:

Cílem diplomové práce je nalezení vhodné metody měření částečných výbojů (PD) v dielektriku vysokonapět'ových kondenzátorů.

V teoretické části této diplomové práci je popsán mechanismus vzniku a škodlivým působením částečných výbojů na izolaci vysokonapět'ových kondenzátorů. Jsou popsány globální galvanická metoda měření částečných výbojů, princip činnosti kaskádního napět'ového násobiče, jeho hlavních komponent, ty jsou vysokonapět'ový kondenzátor a usměrňovací dioda, možnosti měření kvality kondenzátorů pro napět'ové násobiče, výhody a nevýhody a princip činnosti přístroje HIPOTRONICS DDX-8003 s pulzním diskriminačním systémem.

V experimentální části diplomové práci je seznámení s diagnostikou vysokonapět'ových kondenzátorů pomocí laboratorního měření na elektronickém můstku a s pomocí systému měření částečných výbojů. Je popsán návrh vhodné uspořádání elektrod, které eliminuje vliv korony, která znemožňuje měření částečných výbojů i ztrátového činitele ($tg \delta$). Analýzování získaných dat z měření a určení úrovně kvality, případně nastalé degradace měřených kondenzátorů.

Výsledkem práce by měl být návrh rychlé metodiky pro nalezení nekvalitních kondenzátorů za účelem zvýšení spolehlivosti napět'ového násobiče.

KLIČOVÁ SLOVA:

částečné výboje, galvanická metoda, proudový impuls, diskriminace, eliminace, kaskádní napět'ový násobič, vysokonapět'ový kondenzátor, ztrátový činitel, koróna, vysokonapět'ové testování, DDX-8003 PDS, kalibrace, rušení, analýza.

ABSTRACT:

The main subject of the final thesis is to find a suitable method for measuring the partial discharge (PD) in the dielectric of high-voltage capacitor.

In the theoretical part of my thesis contains from the mechanisms of origin and the harmful effects of partial discharge at high voltage insulation of capacitor. It describes the global galvanic method of partial discharge measurement, the principle of cascade voltage multiplier, its main components are high-voltage capacitor and diode, facilities quality measurement of capacitors for voltage multipliers, advantages and disadvantages and principles of HIPOTRONICS DDX-8003 with the pulse discrimination system.

In the experimental part of the diploma thesis is familiar with the diagnostics of high – voltage capacitors by means of laboratory measurements on the electronic bridge and with the help of partial discharge measurement system. Design of suitable electrode arrangement is described which eliminates the influence of corona which makes it impossible to measure partial discharges and the dissipation factor ($\tan \delta$). Analysis data from measurement and determination of quality level, eventual degradation of measured capacitors.

The result of this project should be designed the methodology for finding of poor – quality capacitors in order to increase the reliability of the voltage multiplier.

KEYWORDS:

partial discharge, galvanic method, current impulse, discrimination, elimination, cascade voltage multiplier, high voltage capacitor, dissipation factor, corona, high voltage testing, DDX-8003 PDS, calibration, noise, analysis.

Bibliografická citace díla:

BAEV, D. *Diagnostika vysokonapětových kondenzátorů pro kaskádní napětový násobič*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. XY s. Vedoucí diplomové práce Ing. Michal Krbal, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Diagnostika vysokonapětových kondenzátorů pro kaskádní napětový násobič“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto diplomového projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č.140/1961 Sb.

V Brně dne 25. 05. 2017

.....

Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práci Ing. Michalu Krbalu Ph.D. a konzultantu Ing. Marku Hortu z firmy FEI Thermo Fisher Scientific za metodické a cíleně orientované vedení při plnění úkolů realizovaných v této diplomové práci a cenné rady.

OBSAH

ÚVOD	- 8 -
SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK.....	- 9 -
1. ČÁSTEČNÉ VÝBOJE	- 10 -
1.1. Vnitřní a povrchové částečné výboje	- 11 -
1.1.1. Gemant – Philippovův model	- 12 -
1.1.2. Böningův model	- 14 -
1.2. Vliv vnitřních částečných výbojů na izolaci	- 16 -
1.3. Vnější částečné výboje	- 17 -
1.4. Obrázce částečných výbojů	- 19 -
2. METODA MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ	- 22 -
2.1. Globální galvanická metoda měření částečných výbojů	- 22 -
2.2. Diskriminace a eliminace vnějších vlivů	- 24 -
3. KASKÁDNÍ NAPĚŤOVÉ NÁSOBIČE	- 27 -
3.1. Realizace a parametry napěťového násobiče	- 27 -
3.1.1. Dvoucestný kaskádní násobič napětí	- 27 -
3.1.2. Metodika návrhu	- 29 -
3.2. Využití	- 29 -
3.3. Komponenty napěťového násobiče u napájecího zdroje pro elektronové mikroskopy	- 30 -
3.3.1. Vysokonapěťový kondenzátor	- 31 -
3.3.2. Usměrnovací dioda	- 33 -
4. TEORETICKÉ MOŽNOSTI MĚŘENÍ KVALITY KONDENZÁTORŮ V NAPĚŤOVÝCH NÁSOBIČÍCH.....	- 35 -
4.1. Výdržné stejnosměrné a střídavé zkoušky kondenzátorů (minutová a hodinová zkoušky) při 1,5 až 2 U_n	- 35 -
4.2. Měření ztrátového činitele ($\tan \delta$) v závislosti na napětí do 1,5 U_n	- 37 -
4.3. Částečné výboje – výhody, nevýhody měření kvality kondenzátorů v napěťových násobičích	- 40 -
5. HIPOTRONICS DDX – 8003 PULSE DISCRIMINATION SYSTEM.....	- 41 -
5.1. Pulzní diskriminační systém (Pulse Discrimination System)	- 41 -
5.1.1. Nastavení PDS	- 42 -
5.1.2. PDS okenko Možnosti	- 42 -
5.1.3. PDS nastavení okenko Časové periody	- 44 -
5.1.4. PDS nastavení okenko Jiných možností nastavení	- 46 -
6. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	- 47 -

6.1.	Zadání laboratorní úlohy	- 47 -
6.2.	Galvanická metoda měření ztrátového činitele $\tan \delta$ můstkovým zapojením.....	- 48 -
6.2.1.	Můstkový – metrický systém Tettex 2840.....	- 51 -
6.3.	Galvanická metoda měření částečných výbojů s injektážním kondenzátorem	- 54 -
6.3.1.	HIPOTRONICS DDX – 7000	- 57 -
6.4.	Měření ztrátového činitele $\tan \delta$ můstkovým zapojením	- 64 -
6.5.	Měření částečných výbojů, proudových impulzů s injektážním kondenzátorem.....	- 84 -
6.6.	Měření účinnosti napětí na výstupech v kaskádách u napěťového násobiče	- 99 -
7.	ZÁVĚR.....	- 103 -
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	- 105 -
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	- 106 -
	SEZNAM TABULEK	- 109 -

ÚVOD

Diplomová práce se zaměřuje na teoretický popis a praktický mechanismus detekce částečných výbojů, pomocí kterého můžeme zjistit stav vysokonapětových kondenzátorů. Tyto kondenzátory vlivem provozních podmínek podléhají degradačním mechanismům, které ovlivňují jejich životnost. Důležitou součástí těchto zařízení je izolační systém, který výrazným způsobem ovlivňuje jejich spolehlivost a kvalitu. Z tohoto hlediska se na tento systém stále musí zaměřovat pozornost a pomocí experimentů určovat jejich životnost. Částečné výboje svoji dlouhodobou opakující se činností vedou ke stárnutí izolace kondenzátorů a mohou vést k částečnému průrazu.

V praxi diagnostika vysokonapětových kondenzátorů pomocí měření na elektronickém můstku a s pomocí systému měření částečných výbojů pomůže zjistit stav izolace a určit úroveň kvality měřených kondenzátorů. Je to rychlá metodika pro nalezení nekvalitních kondenzátorů za účelem zvýšení spolehlivosti kaskádního napětového násobiče.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

$tg \delta [-]$	<i>Ztrátový činitel</i>
$n [-]$	<i>Počet stupňů</i>
$U_{stř} [kV]$	<i>Střídavé napětí</i>
$U_0 [V]$	<i>Testovací napětí</i>
$U_n [V]$	<i>Urychlovací napětí</i>
$U_R [V]$	<i>Maximálně závěrné napětí</i>
$U_d [V]$	<i>Napětí v propustném směru</i>
$I [A]$	<i>Proud</i>
$I_{max} [A]$	<i>Maximální impulsní proud</i>
$R [Ohm]$	<i>Odpor</i>
$C_x [F]$	<i>Kapacita</i>
$f [Hz]$	<i>Frekvence</i>
$L [H]$	<i>Indukčnost</i>
$q [pC]$	<i>Zdánlivý náboj</i>
$S [mm^2]$	<i>Plocha vodivých desek</i>
$d [mm]$	<i>Vzdálenost mezi elektrody</i>
$I_{PD} [pC]$	<i>Proudový impulz</i>
ČV	<i>Částečné výboje</i>
PD	<i>Partial discharge</i>
PDS	<i>Pulzní Diskriminační Systém</i>
PN	<i>Pozitiv –negativ přechod</i>
VN	<i>Vysokonapěťový přístroj</i>
RLC	<i>Rezistor Cívka Kondenzátor obvod</i>
ESR	<i>Ekvivalentní sériový odpor kondenzátoru</i>

1. ČÁSTEČNÉ VÝBOJE

Částečný výboj je definován jako lokalizovaný elektrický výboj, který pouze částečně přemostí izolaci mezi vodiči, který se může objevit v okolí vodiče. Obvykle jsou částečné výboje důsledkem lokálního elektrického namáhání v izolaci, na povrchu izolace a objevují se jako impulzy s dobou trvání menší než 1 μ s. [1]

Částečné výboje můžeme popsat jako výboje, které překlenují vzdálenost mezi dvěma elektrodami částečně a zbytek izolace je schopen udržet zcela v provozním stavu. S nárůstem napětí na místě defektů, vzniká jeden nebo více částečných výbojů, co může vést k přerozdělení potenciálu uvnitř objemu izolace. Částečné výboje mohou vzniknout v omezeném prostoru dielektriku se sníženou elektrickou pevností nebo zvýšenou pevností elektrického pole v oblasti izolace dielektriku. [4]

Při zničení izolace se objeví změna fyzikální a chemické vlastnosti dielektriku např. uvolnění plynu, nárůst ztrátového činitele $tg\delta$ a vodivosti. Pod vlivem částečných výbojů dochází k postupnému zničení dielektriku, přičemž charakter a rozsah destrukce závisí na intenzitě částečných výbojů, vlastnostech a typu izolace. Intenzita částečných výbojů vede ke zhoršení pevné fáze izolace a následně k průrazu v izolaci.

Výsledkem přítomnosti částečného výboje se objevujícího ve zkoušeném objektu je proudový impulz I_{PD} nebo jinými slovy impulz částečného výboje. Tento impulz je poté měřen prostřednictvím vhodných detekčních elektrických metod, např. galvanickou metodou. Částečné výboje silně snižují spolehlivost, kvalitu a životnost přístrojů a systémů a vlivem způsobují tyto škodlivé následky: [4]

Sníží se životnost dielektrik. Bombardování elektrony, ionty a přehřátí zničí izolační materiál dielektrik.

Impulzy s vysokým kmitočtem a s takovou amplitudou vyvolané částečnými výboji v proudových obvodech vedou k rušení signálů elektrických spojů.

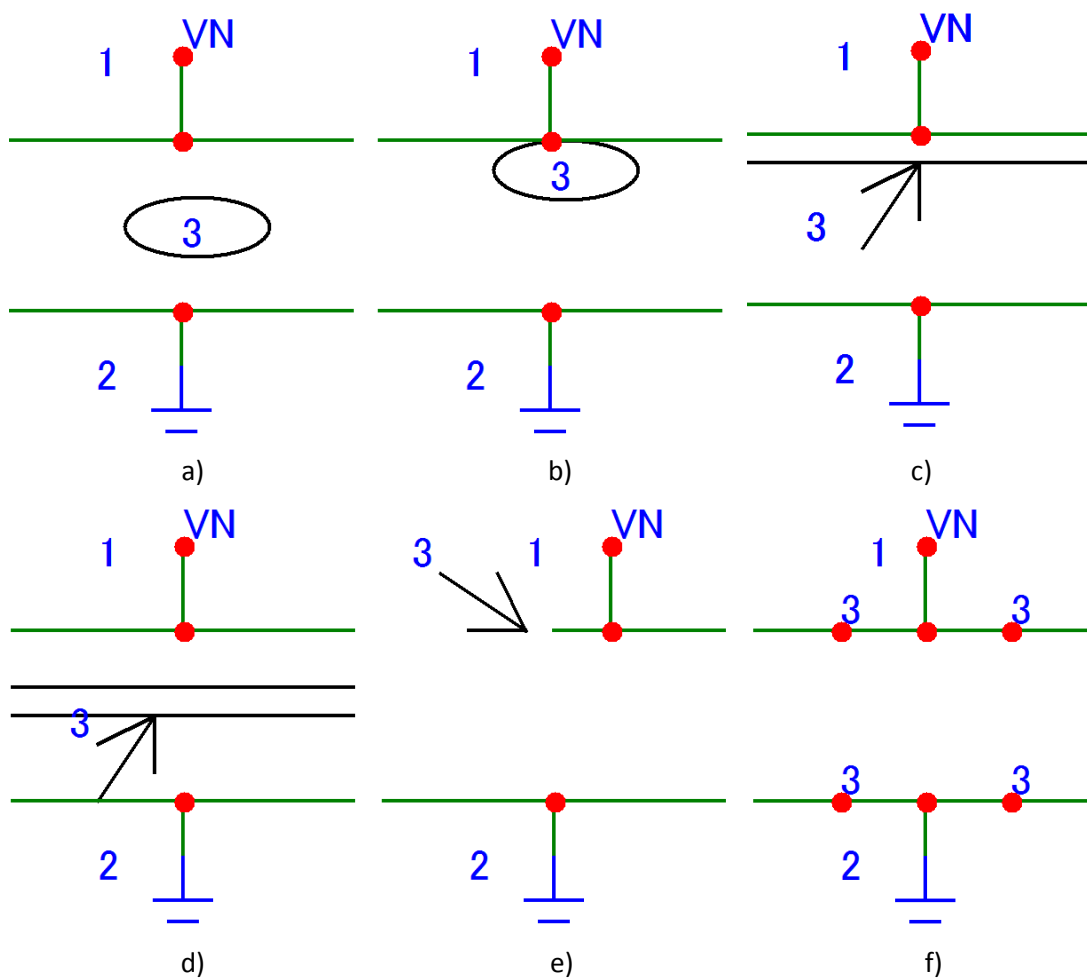
Částečné výboje vyvolávají postupné zhoršování kvality izolačního systému a tím snižují jeho elektrickou pevnost a pomocí globálního měření částečných výbojů lze odhadnout celkový stupeň znehodnocení izolace izolačního systému.

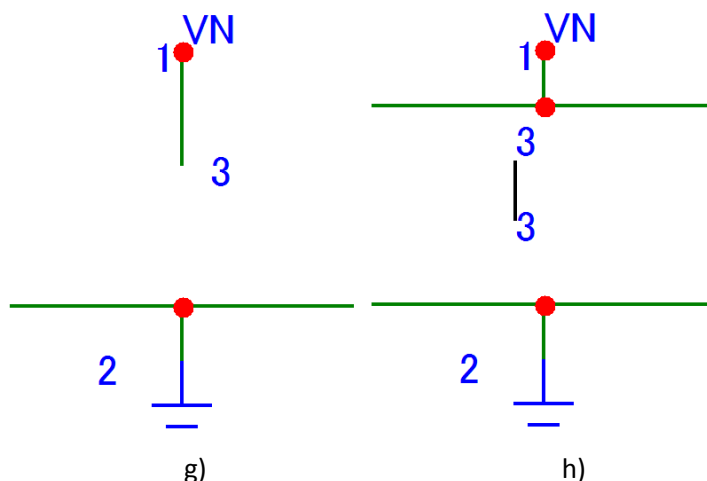
Částečné výboje lze rozdělit podle místa výskytu: [2]

- Vnitřní částečné výboje;
- Povrchové částečné výboje;
- Vnější částečné výboje.

1.1. Vnitřní a povrchové částečné výboje

Obvykle vnitřní částečné výboje vznikají v plynně vyplněných dutinách uvnitř kapalného nebo pevného izolantu. Vznik těchto dutin může nastat během výroby materiálu, ale většinou nastává během užívání v provozních podmínkách. Dalšími možnostmi vzniku částečných výbojů je nehomogenita mezi izolantem a elektrodou. [6]





Obr. 1.1: Možnosti vzniku částečných výbojů [5]

- a) plyná dutina v pevném izolantu; b) povrchová dutina pod elektrodou; c) štěrbina mezi elektrodou a pevným izolantem; d) štěrbina uvnitř izolantu; e), f) povrchové resp. klouzavé výboje; g), h) rozhraní jehlová elektroda-izolant.

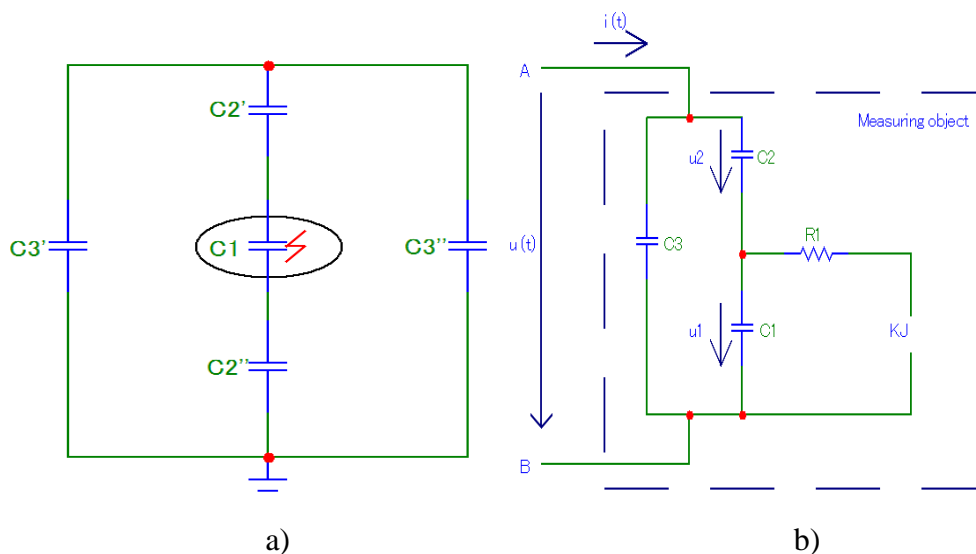
Na **Obr. 1.1** je vidět typické elektrodové uspořádání, na kterých lze modelovat jednotlivé druhy vnitřních a povrchových částečných výbojů. Zde elektrody jsou označeny čísly 1 a 2, číslem 3 oblast výbojové činnosti částečných výbojů.

Podmínkou vzniku výbojové činnosti je rozdílnost elektrického namáhání plynu uvnitř dutinky a okolního materiálu. Elektrická pevnost okolního izolantu je vždy větší než elektrická pevnost prostředí v dutince, poté dojde k průrazu prostředí v dutince při napětí nižším než je průrazné napětí izolace okolního izolantu. V případě, že napětí dosáhne hodnoty průrazného napětí, dochází k průrazu plynu. [6]

1.1.1. Gemant – Philippovův model

Vznik částečných výbojů a jejich základní vztahy může být popsán pomocí analýzy náhradních obvodů. Výchozí podmínkou pro modelování je přítomnost pevného nebo kapalného izolantu s jednou dutinou představující vnitřní nehomogenitu izolantu. Tyto modely vycházejí ze základního Gemant – Philippovova modelu (troj kapacitní model), které je vidět na **Obr. 1.2**. [2]

Na **Obr. 1.2a** je schematicky znázorněn pevný izolant s vnitřní plynovou dutinou a na **Obr. 1.2b** jeho zjednodušené náhradní schéma.



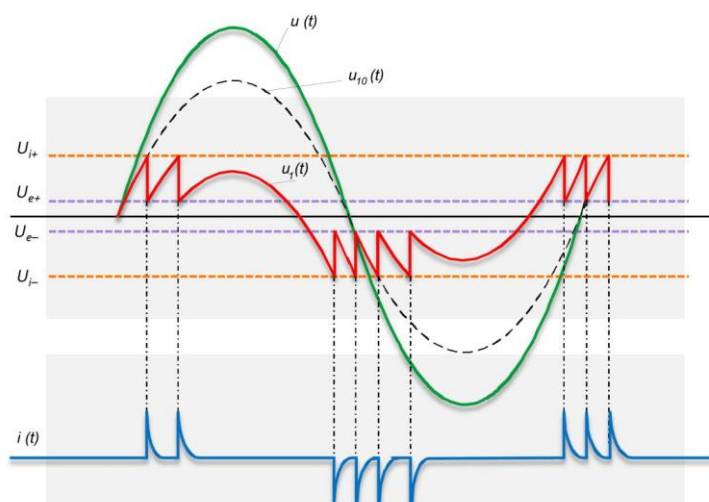
Obr. 1.2: Gemant – Philippovův model [5]

a) pevný izolant s plynovou dutinou; b) náhradní schéma.

Kapacita C_1 je kapacita samostatné plynové dutinky, C_2 je kapacita zbytkové části zdravé izolace v sérii s kapacitou dutinky, C_3 je kapacita nepoškozené části dielektrika, odpor R představuje odpor výbojového kanálu na KJ , tedy odpor cesty proudu výboje v oblasti vybíjených plošek povrchu dutinky a odpor dráhy výboje a KJ je kulové jiskřiště, jehož zapálení představuje částečný výboj. Tento děj, v prostorových poměrech, proběhne řádově za jednotky ns. Pokud na svorky vzorku (objektu) 1 a 2 přiložíme střídavé napětí $u(t)$ a za předpokladu, že nedojde k přeskoku v dutince (na KJ), je průběh napětí $U_{10}(t)$ na kondenzátoru C_1 dán vztahem: (1) [3], [7]

$$U_{10}(t) = \frac{C_2}{C_1 + C_2} u(t) \quad (1)$$

Obr. 1.3 znázorňuje časový průběh napětí a proudu při částečném výboji.



Obr. 1.3: Časový průběh napětí a proudů Gemant – Philippovova modelu [6]

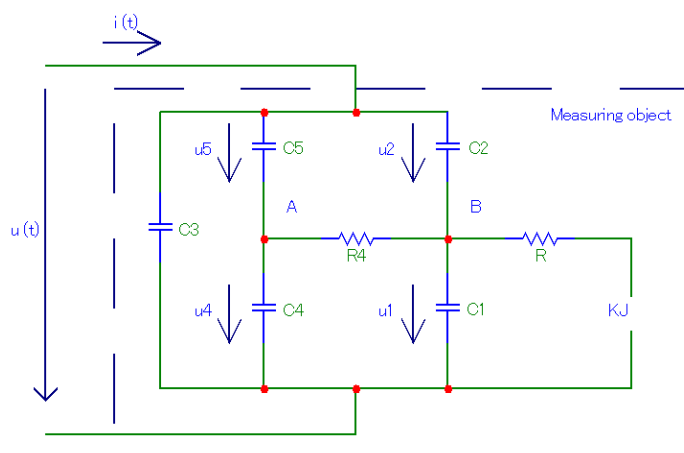
V okamžiku, kdy přiložené napětí $u(t)$ dosáhne hodnoty zapalovacího napětí U_i , dojde na dutince k výboji. Výboj zaniká při poklesu na hodnotu napětí zhášecího U_e . Výboj v dutince se opakuje, v případě, že velikost napětí na dutince $U_1(t)$ dosáhne hodnoty zápalného napětí. Napětí $U_{10}(t)$ je to napětí na dutince v případě, že nedojde k výboji. Vzniklé proudové impulzy částečných výbojů jsou znázorněny průběhem $i(t)$. [5]

1.1.2. Böningův model

Pro přesnější popis vývojové činnosti slouží Böningův model (pět kapacitní model)

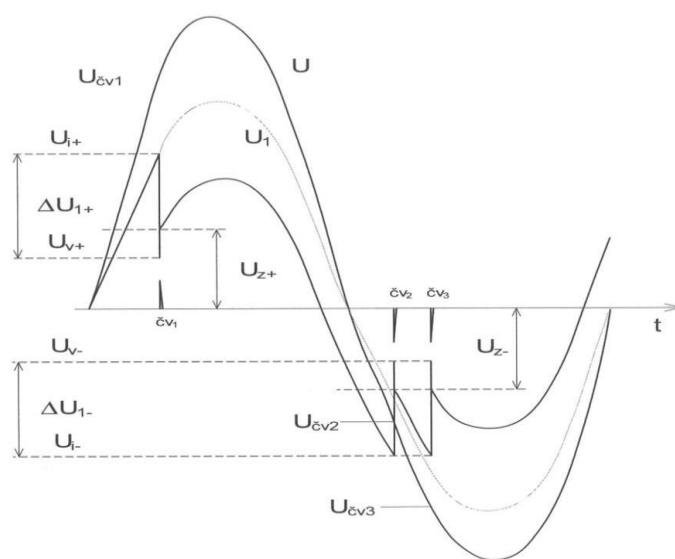
Obr. 1.4. U tohoto modelu se uvažuje, že se na procesu vybíjení nepodílejí pouze plochy dutinky, ale i určitá část okolního materiálu obklopujícího tuto dutinku. K odsávání nábojů při průrazu dochází nejen ze stěn dutinky, ale i z materiálu v okolí dutinky. Nedochozí tedy k poklesu napětí jen na dutince ale i v jejím okolí. [3], [7]

Původní Gemant – Philippovův model je dle **Obr. 1.4** rozšířen o kapacity C_4 a C_5 a rezistor R_4 . Zde kapacita C_4 představuje vliv okolí dutinky. Kapacita C_5 reprezentuje kapacitu zbytku izolantu. Odpor R_4 reprezentuje odpor stěn dutinky a jejího blízkého okolí.



Obr. 1.4: Bönigkův model [7]

Na **Obr. 1.5** je znázorněn časový průběh napětí při částečných výbojích na Bönigkově modelu. Průběh napětí je podobný jako v případě troj kapacitního modelu.



Obr. 1.5: Průběh napětí při částečných výbojích na Bönigkově modelu [4]

Při dosažení zapalovací hodnoty napětí na dutince dojde k výboji a napětí na dutince klesne na hodnotu zůstatkového napětí U_p . Hlavní rozdíl mezi pět kapacitním a troj kapacitním modelem je v tom, že u pět kapacitního modelu nedochází k nárůstu napětí po výboji z hodnoty zůstatkového napětí, ale z hodnoty zotaveného napětí U_z . Vznik zotaveného napětí vychází z řešení napěťových rovnic náhradního obvodu modelu bezprostředně po ukončení výboje. V tomto okamžiku dochází k opětovnému nabíjení kondenzátoru C_1 prostřednictvím kondenzátoru C_4 a odporu R_4 . [4]

1.2. *Vliv vnitřních částečných výbojů na izolaci*

Vnitřní částečné výboje mají destruktivní vliv na izolační systém, protože způsobuje snižování elektrické pevnosti materiálu a zkracování životnosti izolantu. To je způsobeno tím, že výboje v dutinkách způsobují přímými i nepřímými účinky chemické a fyzikální změny v izolantu a jeho blízkosti.

Na zhoršení vlastností izolantu se obecně podílejí tyto procesy: [3], [7]

- Elektro – erozivní účinky;
- Účinky záření vznikajícího při výbojích;
- Chemické účinky;
- Tepelné účinky;
- Účinky lokálního zvýšení gradientu na konci výbojového kanálu;
- Mechanické účinky.

Elektro – erozivní účinky. Je-li hodnota intenzity elektrického pole dostatečně vysoká, může koncentrace elektrického pole vyvolat čistě elektrický průraz a vodivá dráha, která je následkem vývinu oblouku v dutince, se může šířit dále izolantem. Při velké intenzitě elektrického pole může koncentrace tohoto pole vytvořit elektrický průraz, který může v dutinkách vytvářet uhlíkové vodivé kanály nebo elektrické stromečky.

Erozivní účinky mají i elektrony a ionty, které ostřelují stěny dutinky a způsobují její rozrušování. Tím se zvětšuje rozměr dutinky, může dojít k průrazu a jak daný izolant je schopen odolát výbojům zaleží na chemickém složení a struktuře izolantu. [3], [7]

Účinky záření vznikajícího při výbojích. Chemické reakcí vyvolá kvůli větší energii ultrafialového záření, která vzniká při výbojích. [3]

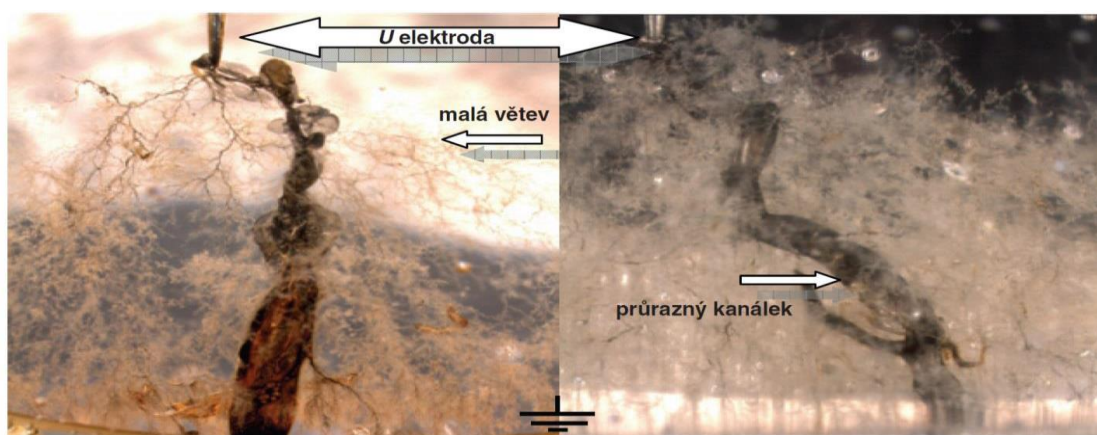
Chemické účinky. Výsledkem chemických reakcí jsou pevné, plynné a kapalné produkty. S postupem času však těchto látek přibývá a tyto se začnou šířit i do oblastí obklopujících dutinku a narušováním izolačního materiálu a jejich infiltrací do něj zvyšují jeho vodivost. Tyto produkty rozkladu mohou dále prostupovat do pevného izolantu a vytváří tak vodivé oblasti. Tyto vodivé oblasti často dosahují velkých rozměrů a významným způsobem zhoršují elektrické vlastnosti výchozího materiálu. [2], [3], [7]

Tepelné účinky. Částečné výboje mohou svoji aktivitou způsobit tepelnou nestabilitu. Není-li vytvořené teplo izolačním materiálem dostatečně dobře odváděno a tím může dojít k přehřátí materiálu a v nejhorším případě i k tepelnému průrazu. V materiálu izolantu vzniká jak teplo od výbojů, tak i teplo vzniklé dielektrickými ztrátami ale z jiné strany zvyšování

teploty materiálu má sice pozitivní efekt na snižování počtu výbojů, na druhé straně dochází k tomu, že vznikající výboje mají větší intenzitu. [3]

Účinky lokálního zvýšení gradientu na konci výbojového kanálu. V blízkosti konce výbojového kanálu elektrické pole má podobné vlastnosti jako elektrické pole v okolí hrotu jehly, to znamená, že jeho intenzita dosahuje lokálně vysokých hodnot. Tedy se jedná o šíření vodivých dráh, které ovšem neprobíhá pravidelně, ale výbojové kanály se postupně rozvětvují a vzniká tak stromečkový útvar. Kanály postupně pronikají materiálem tak, až překlenou celou vzdálenost mezi elektrodami a dojde tak k průrazu izolantu. Elektrický stromeček se vyskytuje především v silně namáhaných jednovrstvých izolantech, např. kondenzátorech, kabelech. [2]

Příklad elektrického stromečku je na **Obr. 1.6**.



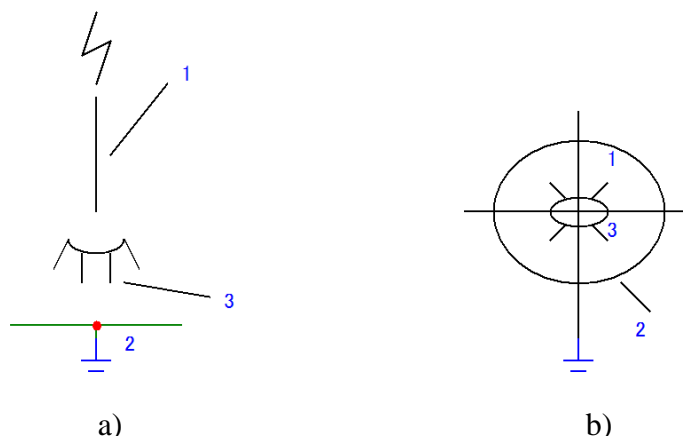
Obr. 1.6: Elektrický stromeček po průrazu izolace [6]

Mechanické namáhání. Vlivem mechanického namáhání izolačních materiálů a působením vnějšího elektrického pole vznikají nosiče náboje, které se postupně seskupují v izolantu. Nosiče stejné polarity se vzájemně odpuzují a náboje různé polarity se navzájem přitahují, těmito reakcemi nábojů se dále zvyšuje mechanické namáhání, které je závislé na počtu dopadajících částic a rychlosti jejich srážek. Celý proces vede ke zvětšování dutinky a následnému možnému průrazu. [2], [3]

1.3. Vnější částečné výboje

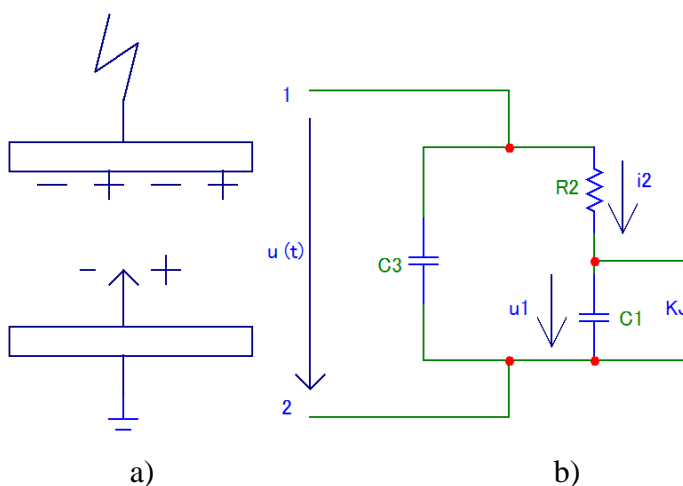
Nejčastěji tento typ se vyskytuje na hranách nebo malých poloměrech elektrod, které se nacházejí v plynném prostředí. Pro tento typ výbojů je typické uspořádání hrot – deska. Při tomto uspořádání se částečné výboje objevují na ostrém zakončení hrotové elektrody.

Tento typ výboje je znázorněn na **Obr. 1.7**, kde elektrody jsou označeny čísly 1 a 2 a oblast částečných výbojů číslem 3.



Obr. 1.7: Elektrodové uspořádání vnějšího částečného výboje [3]

Na **Obr. 1.8** znázorňuje zjednodušené náhradní schéma vnějšího částečného výboje v uspořádání hrot – deska.

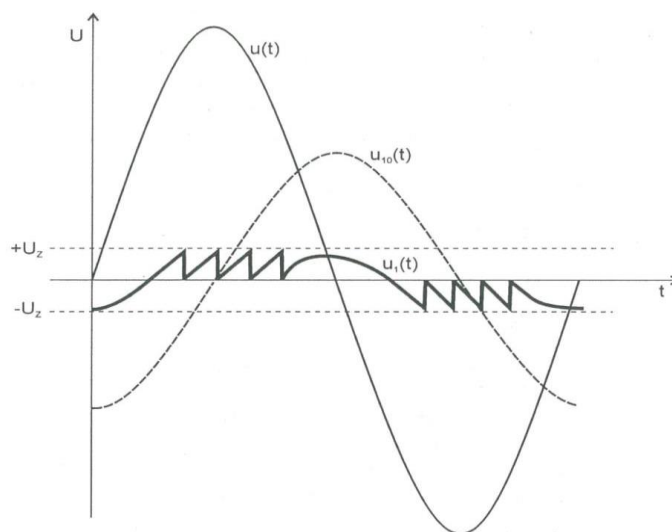


Obr. 1.8: Náhradní schéma pro vnější částečný výboj [3]

Kondenzátor C_1 představuje kapacitu vzduchového prostoru, který je vždy zkratován, v případě když rovné zapalovacímu (průraznému) napětí U_i poté dojde k částečným výbojům. Odpor R_2 reprezentuje vodivost náboje, který je vytvořen na hrotu výboje a vlivem elektrického pole k elektrodě opačné polarity. Kondenzátor C_3 reprezentuje paralelní kapacitu elektrodového uspořádání. [3]

Časový průběh napětí pro vnější částečné výboje je na **Obr. 1.9**, kde jsou znázorněny průběhy napájecího napětí $u(t)$, fiktivního napětí $U_{10}(t)$ tj. napětí na kapacitě C_1 v případě, že by nedošlo k částečnému výboji a skutečné napětí $U_1(t)$ při existenci částečných výbojů. Částečné výboje vznikají v okamžiku, kdy okamžitá hodnota na kapacitě dosáhne hodnoty U_i .

Vnější částečné výboje nemají trvalý destruktivní vliv na izolant. [3]



Obr. 1.9: Časový průběh napětí při vnějším výboji [5]

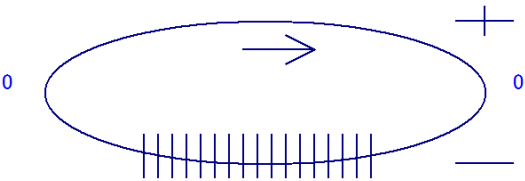
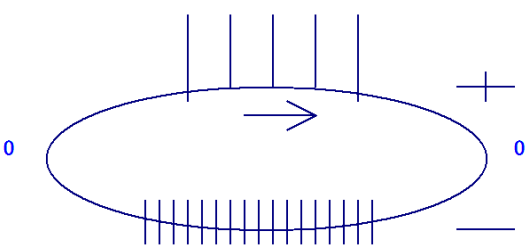
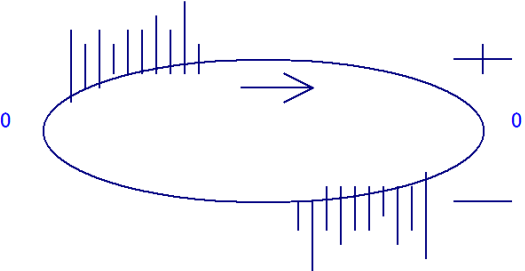
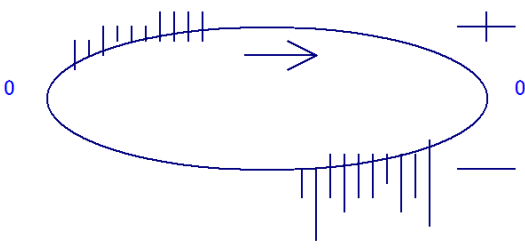
Předcházení částečným výbojům můžeme detekovat pomocí preventivním používáním různých metod. Jedná se jak o metody neelektrické (jako např. akustické, optické, chemické), tak metody elektrické (galvanickou metodou, kapacitními či induktivními sondami apod.). Tyto metody se neustále vyvíjí, jak po stránce teoretické, tak technické. Každá z metod má také své výhody a nevýhody. V současné době se dostávají hlavně on-line měření, které umožňují měřit částečné výboje za provozu stroje, bez nutnosti odstávky zařízení. [2]

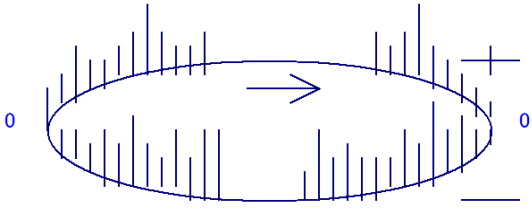
Pravidelné měření částečných výbojů VN zařízení se doporučuje provádět během fáze výrobních testů, poté po montáži na místě instalace a dále během celé doby jeho provozu. Četnost zkoušek závisí na typu zařízení, jeho významu v energetickém systému. V případě, že částečné výboje je zjištěná v raném stádiu, jejich pravidelné měření se doporučuje monitorovat izolační stav materiálu.

1.4. Obrázce částečných výbojů

Při měření výbojové činnosti lze rozlišit několik typů částečných výbojů. K určení druhu a zdroje výbojové činnosti se využívají obrázce částečných výbojů. Druh a tím místo vzniku a povahu částečného výbojů lze určit podle fázového uhlu umístění částečných výbojů.

Obrázce částečných výbojů se nejčastěji zobrazují ve formě Lissajousových obrázců, kde jsou proudové impulzy částečných výbojů superponovány na průběh napájecího napětí.

Typ	Osciloskopický obraz	Popis výboje	Typ výboje
A		Stejná velikost pulzů v jedné půlperiodě, symetricky je okolo napět'ového maxima. Počet pulzů se narůstá se zvyšováním napětí, ale jejich velikost se nemění. Při vyšším napětí jsou pulzy pouze ve druhé půlperiodě.	Hrot-deska v plynech. V případě, že je hrot na vysokém potenciálu, objevují se pulzy v záporné půlperiodě; je hrot na zemním potenciálu v kladné půlperiodě.
B		Okolo napět'ových maxim pulzy symetricky v obou půlperiodách; V jedné půlperiodě pulzy větší, než ve druhé půlperiodě, tam jsou větší počet menších pulzů stejné velikosti. Se zvyšováním napětí počet pulzů narůstá.	Hrot-deska v kapalných dielektrikách. V případě, že je hrot na zemním potenciálu, pulzy se objevují v záporné půlperiodě. Je hrot na vysokém potenciálu, je v kladné půlperiodě.
C		Pulzy mezi průchody nulou a vrcholy napětí v obou půlperiodách. Pulzy mají přibližně stejnou velikost v obou půlperiodách.	Vzduchové dutinky v kapalném a dutinky v pevném dielektriku. Výboje na povrchu bez galvanického spojení. Neuzemněné kovové části měřicího obvodu.
D		Pulzy mezi průchody nulou a vrcholy napětí v obou půlperiodách. Pulzy v jedné z půlperiod jsou vyšší než pulzy ve druhé půlperiodě.	Dutinky v pevném dielektriku u elektrod. Vzduchové dutinky v kapalném dielektriku u elektrod. V případě, že se velké pulzy objevují v kladné půlperiodě, jsou výboje na vysokém potenciálu; v jiném případě, se velké pulzy v záporné, jsou

			výboje na zemním potenciálu.
E		Pulzy symetricky kolem obou průchodů nulou napětí.	Špatný kontakt mezi kovovými částmi nebo mezi polovodivými vrstvami.

Obr. 1.10: Typy obrázků částečných výbojů [3]

2. METODA MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ

Částečné výboje jsou doprovázeny řadou fyzikálních jevů elektrického (vznik proudových impulzů a generování vysokofrekvenčního elektromagnetického pole) i neelektrického charakteru (světelné záření, zvukové jevy, tepelný ohřev).

Měření částečných výbojů se dá rozdělit na metody globální (nám dává možnost sledování celkového přehledu o stavu izolací zkoumaného objektu) a lokalizační (má za úkol k přesnému určení místa působení částečných výbojů). [2], [3]

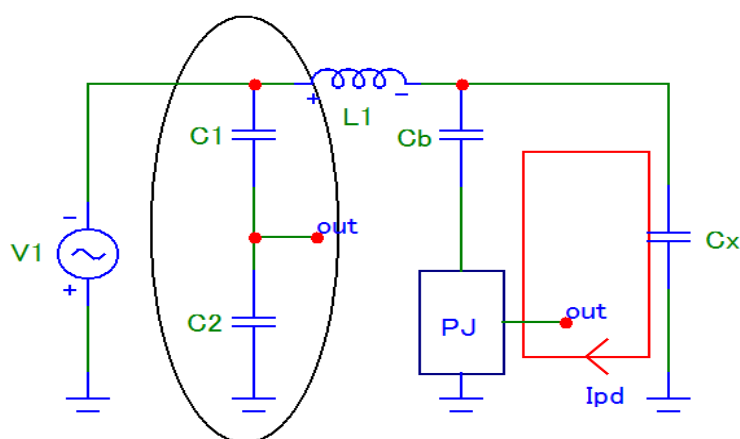
Diplomová práce je zaměřená na měření a detekování částečných výbojů principem elektrických metod. Nejvhodnější metodou obvykle je galvanická metoda, její cílem je měření proudových impulzů I_{PD} , které vznikají působením částečných výbojů.

2.1. *Globální galvanická metoda měření částečných výbojů*

Jednou z nejrozšířenějších globálních metod pro detekci částečných výbojů je galvanická metoda. Obvykle částečné výboje se měříme v pC. Galvanická metoda využívá principu vzniku impulsního proudu testovaným objektem při vzniku uvnitř jeho struktury částečného výboju.

Princip měření galvanickou metodou popíšeme dále. K testovanému objektu C_x je připojen tzv. blokovací kondenzátor C_b , kterým procházejí proudové impulsy ve smyčce. Přizpůsobovací jednotka (měřicí impedance) je umístěna ve spodní části obvodu sériové s blokovacím kondenzátorem C_b , která propustí proud o síťové frekvenci, ale se odfiltruje vysokofrekvenční složku, jež je přiváděna do měřicího systému a ihned vyhodnocena. Vysokofrekvenční měřicí smyčka je oddělena od napájecího zdroje přes dimenzovanou oddělovací impedanci, také se dá použít i další filtry. [8]

Schéma zapojení obvodu je znázorněno na **Obr. 2.1**.



Obr. 2.1: Schéma zapojení galvanické metody pro měření částečných výbojů [8]

C_1 – vysokonapět'ový kondenzátor kap. děl.;

C_2 – niskonapět'ový kondenzátor kap. děl.;

C_b – blokovací kondenzátor;

C_x – měřený objekt;

I_{PD} – impulzní proud částečných výbojů;

PJ – přizpůsobovací jednotka (měřicí impedance).

Místo poruchy případně jeho charakter můžeme lokalizovat z fáze naměřených impulzů a jejich intenzity. Vznik částečných výbojů a koróny je do principu prakticky stejný děj, a proto je velmi obtížné prakticky odlišit, ale částečné výboje obvykle vznikají uvnitř testovaných objektů, ve vnitřní struktuře pevném nebo kapalném dielektriku. Nejčastěji koróna vzniká u přivodních elektrod, na hrotech, nerovnostech a tenkých vodičích ve vzduchu. Po měření člověk musí rozhodnout část naměřených impulzů s projevy koróny nezapočítávat do výsledné hodnoty naměřených částečných impulsů. [8]

Při zpracování naměřených dat počet proudových impulzů neodpovídá fyzickému počtu poruch v testovaném objektu. Vznik jedné poruchy může způsobit více impulzů během periody.

Tvar jednotlivých impulzů vrcholových hodnot poruchy může mít různou formu ne vždy je kvádr, koule nebo elipsoid. To záleží na jejich rozdílném vzníkem.

Galvanická metoda používá jako vyhodnocovací parametr tzv. zdánlivý náboj (náboj, který je přiveden na svorky zkoušeného objektu a způsobí takovou změnu výchylky, kterou by způsobil vlastní proudový impuls částečného výboje je zdánlivý náboj q . Zdánlivý náboj se nerovná náboji působícího v místě výboje, který nemůže být přímo měřen. Udává se v jednotkách C, respektive pC. [4], [6]), který nelze přímo změřit. Je nezbytné změřit odezvu měřicího obvodu na daný náboj a tím je možné porovnávat jednotlivá měření mezi sebou. Proto se před samotným měřením provádí proces kalibrace obvodu. Toto se provádí

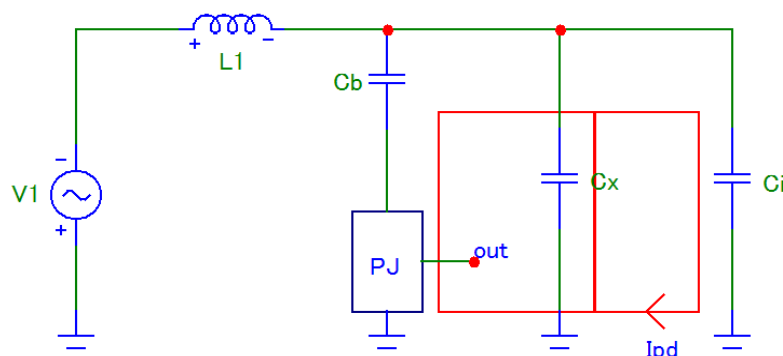
tak, že se daným přístrojem (kalibrátorem) injektuje do obvodu předem známý náboj a na zobrazovacím zařízení se sleduje výstupní signál. Podle této referenční úrovně se pak provádí přepočet změřeného zdánlivého náboje.

2.2. Diskriminace a eliminace vnějších vlivů

Do měřicího obvodu mohou vcházet rušení z vnějších objektů, a proto pro dosažení správných naměřených hodnot je nutné provést kalibraci systému, např. při každé změně zapojení, změně měřeného obvodu nebo nastavení měřicí jednotky. Tento účel splní injektážní kondenzátor C_i .

Pomocí injektážního kondenzátorů C_i do kterého z kalibrátoru jsou přiváděny impulzy známých vrcholových hodnot a v případě i znalosti velikosti injektážního kondenzátoru C_i je možná těmto impulzům přiřadit měřicím systém konkrétní hodnotu v pC.

Schéma zapojení obvodu s injektážním kondenzátorem C_i je uvedeno na **Obr. 2.2**.



Obr. 2.2: Schéma zapojení galvanické metody pro měření částečných výbojů s injektážním kondenzátorem [8]

C_b – blokový kondenzátor;

C_x – měřený objekt;

C_i – injektážní kondenzátor;

I_{pD} – impulzní proud částečných výbojů;

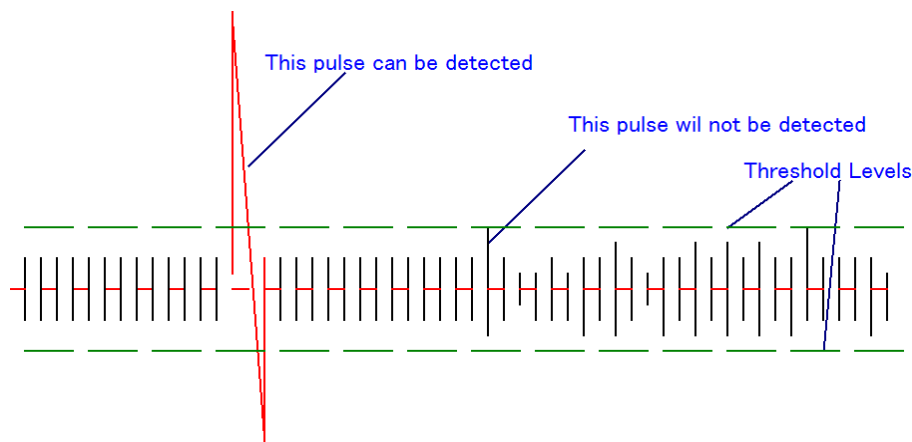
PJ – přizpůsobovací jednotka (měřicí impedance).

Nejvhodnější kalibrace je rychlá kalibrace, při které je měřicí systém schopen eliminovat periodicky opakovatelná rušení.

Pro další eliminaci rušení vcházejícího do měřicího systému je možné použít dva typy pulsního diskriminačního systému – vertikální a horizontální: [8], [16]

- Horizontální pulsní diskriminační systém. V systému vzniká rušení, která nesmí být započítána do výpočtu hodnoty částečných výbojů;

- Vertikální pulsní diskriminační systém. Zjistit existenci vnějšího vlivu můžeme pomocí napěťové prahové hladiny. V případě, když elektrický signál je větší než napěťová prahová hladina, systém zjistí existenci vnějšího vlivu. Nezjištěné pouze ty vnější vlivy, které jsou pod prahovou hladinou na **Obr. 2.3**.



Obr. 2.3: Grafické existenci signálu vnějšího vlivu [10]

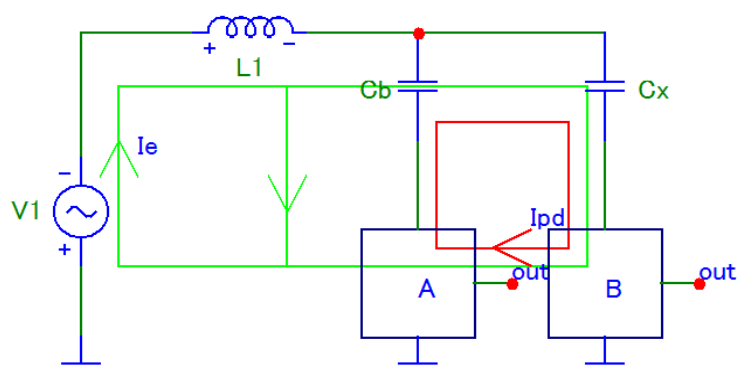
Threshold Levels – napěťová prahová hladina;

This pulse can be detected (red color) – pulzní průběh bude detekován (červená barva);

This pulse will not be detected (black color) – pulzní průběh nebude detekován (černá barva).

V případě potřeby zvýšení citlivosti měření nebo měření částečných výbojů v řádu desetin pC až jednotek pC je možné využít diferenciálního můstkového zapojení. Tento systém je složitější na obsluhu, nicméně dává více možností provádět eliminaci vnějších rušení. Zapojení využívá principu měření impulzů na dvou přizpůsobovacích jednotkách. První jednotka A je zapojena ve větvi blokovacího kondenzátoru C_b , druhá jednotka B ve větvi měřeného objektu C_x . Na měřicích jednotkách A a B sleduje polarita signálu v obvodech. Proudový impulz I_{PD} , který vzniká v měřeném objektu C_x znamená, že polarita naměřených impulzů oběma jednotkami zapojenými v měřené smyčce je odlišná a tím se jedná o vnitřním částečném výboji a to do konečného výsledku budou započteny. V opačném případě proudové impulzy z vnějšího rušivého zdroje, například z napájecího zdroje nebo okolních zařízení, jsou naměřené polarity totožné, a tím se jedná o vnějším rušení a to nebudou započteno do konečného výsledku. Velkou nevýhodou tohoto systému je nemožnost použít injektážní kondenzátor C_i pro kalibraci, kterou je třeba provádět pomocí ručního kalibrátoru a tím prodlužuje samotné měření. [8], [10]

Schéma zapojení diferenciálního můstkového zapojení je uvedeno na **Obr. 2.4**.



Obr. 2.4: Diferenciálního můstkového zapojení systému pro měření částečných výbojů [8]

C_b – blokovací kondenzátor;

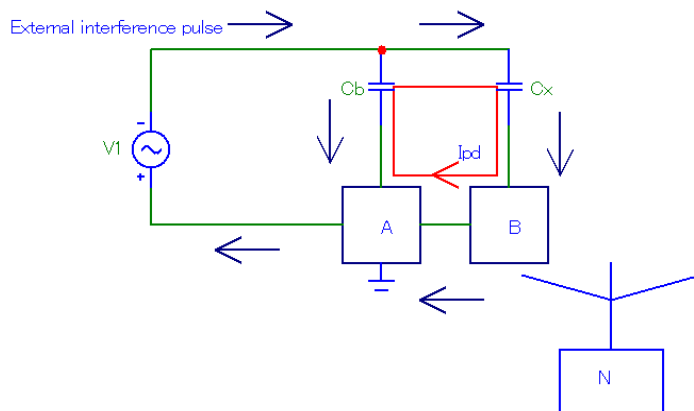
C_x – měřený objekt;

I_{PD} – impulzní proud částečných výbojů;

I_e – proud z externích rušivých zdrojů;

A, B – přizpůsobovací jednotky (měřicí impedance).

Rušení přicházející do měřicího obvodu v podobě rádiových vln je možné eliminovat pomocí externí antény **Obr. 2.5**.



Obr. 2.5: Schématické zapojení systému pro měření částečných výbojů s externí anténou [9]

C_b – blokovací kondenzátor;

C_x – měřený objekt;

I_{PD} – impulzní proud částečných výbojů;

N – externí antena;

A, B – přizpůsobovací jednotky (měřicí impedance);

External interference pulse – vnější rušivé pulzy.

3. KASKÁDNÍ NAPĚŤOVÉ NÁSOBIČE

Násobič napětí je měnič napětí sestavený z kondenzátorů a diod, který mění střídavé napětí na stejnosměrné napětí o několikanásobně vyšší hodnotě. Princip zapojení obvodu funguje tak, že jedna půlperioda střídavého proudu nabíjí kondenzátory paralelně, a druhá (opačná) perioda je v sériovém zapojení vybíjí. Pro jednu dvojici diody s kondenzátorem vznikne na výstupu dvojnásobek vstupního napětí. Tento základní obvod je možno kaskádovitě opakovat a vytvořit tak výstup s mnohonásobně vyšším napětím.

Pomocí napětových násobičů můžeme nahradit drahé transformátory, které nám také umožňují zvýšení střídavého napětí. Komponenty pro napětové násobiče používají diody a kondenzátory. Je možná použití neomezeného počtu jejich stupňů, ale tomu brání ztráty, které se vzniknou v dielektriku kondenzátoru, především svodovým proudem. Dále výkonový a napětový úbytek a nenulový závěrný proud na diodách. Velmi rychle klesá účinnost při používání více stupňů diod a kondenzátorů.

3.1. *Realizace a parametry napětového násobiče*

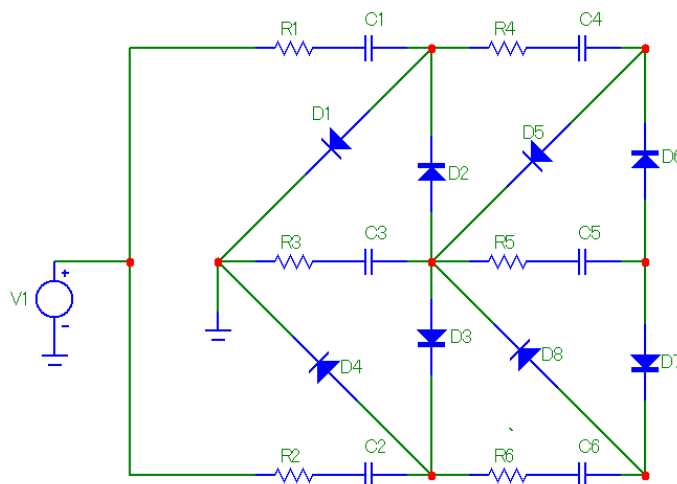
V této kapitole budeme mluvit o realizaci napětového násobiče, v našem případě je to dvoucestný kaskádní násobič napětí, který se používá v napětovém zdroji elektronového mikroskopu a jeho hlavních parametru.

3.1.1. *Dvoucestný kaskádní násobič napětí*

Násobiče napětí pracují obecně na podobném principu jako zdvojovače. Jde o opakované spojení jednotlivých typů usměřovačů tak, aby z hlediska vstupu byly spojeny paralelně a z hlediska výstupu sériově (sčítání příspěvků dílčích částí). Takto koncipované násobiče označujeme termínem kaskádní. [11]

Obvodově je kaskádní násobič složen z řady jednocestných usměřovačů. Kromě jednocestných usměřovačů lze řadit do kaskády také usměřovače dvoucestné.

V našem případě, dvoucestný kaskádní násobič, je používán v elektronovém mikroskopu na **Obr. 3.1**.



Obr. 3.1: Schéma dvoucestného kaskádního násobiče napětí.

V průběhu činnosti násobiče záporné a kladné půlvlny se nabíjejí kondenzátory C_1 a C_2 , které jsou zapojeny paralelní v obvodech jednotlivých můstků. Poté proud přejde přes diody D_1 a D_4 a tím se rozlouží to napětí. Výsledný násobné napětí dále přes diody D_2, D_3 začne nabíjet další kondenzátory a děj se zopakuje.

Násobič pracuje na frekvenci cca 20 kHz, jeho výstupní proud z násobiče (z posledního stupně) je 400 – 600 μA . V 300 kV zdroji je použito 14 desek násobiče, v 200 kV zdroji je použito 9 desek násobiče, napájecí napětí násobiče je cca 20 kV.

Výhody při stejné volbě součástek je schopen dodávat do zátěže dvojnásobný proud.

Násobiče se obecně chovají jako tzv. měkké zdroje napětí, to znamená, že výstupní napětí poměrně rychle klesá s velikostí odebíraného proudu. Z toho je zřejmé, že násobiče napětí by měly pracovat blízko stavu naprázdno (zátěžný rezistor velkých hodnot).

Teoreticky by bylo možné zvyšovat počet stupňů násobiče neomezeně, ale v praxi je počet stupňů omezen.

Prakticky se napět'ové násobiče používají pouze v tzv. jedno pulsních provedeních ale také existují tzv. dvoj pulsní napět'ové násobiče. Dvoj pulsní využívající obě dvě polarity z napájecího zdroje. Z důvodů ztrát a omezení v proudu na praktice je možnost realizace maximálního počtu stupňů přibližně 8. U vícestupňových provedení je z důvodů principů činnosti velmi pomalý náběh dosažení maximálního napětí, které při síťové frekvenci napájecího zdroje může dosáhnout několika s. [8]

Hlavními parametry napěťového násobiče jsou:

I [A] – je proudový odběr;

U_0 [V] – je výstupní napětí naprázdno;

n [-] – je počet stupňů násobiče;

C [F] – je velikost kapacity kondenzátoru;

f [Hz] – je frekvence.

Při znalosti proudového odběru I , výstupního napětí naprázdno U_0 a počtu stupňů násobiče n , lze z podle následujícího vztahu vypočítat velikost kapacity kondenzátorů C :

$$C = \frac{I}{f * U_{vys} * 2n * (n+2)} \quad (2)$$

Posledním parametrem, který ve vztahu vystupuje, je frekvence f . Při jejím zvyšování je možná použít kondenzátory s menší kapacitou. Aby během provozu nedošlo překročení výkonových ztrát je nutně komponenty násobičů správně dimenzovat. [8]

3.1.2. Metodika návrhu

Diody vybíráme z katalogu podle hodnot $U_R > 2U_0$ a $I_F = I_{Rz}$. [11]

Kapacitu jednotlivých kondenzátorů lze volit podle empirického vztahu:

$$C > \frac{2n * (n+2) * I_{Rz}}{U_0 f} [F; A, V, Hz], \quad (3)$$

kde

C [F] – je velikost kapacity kondenzátoru;

n [-] – je počet stupňů násobiče;

I_{Rz} [A] – je střední hodnota proudu do zátěže;

f [Hz] – je kmitočet vstupního napětí sítě;

U_0 [V] – je výstupní napětí naprázdno.

3.2. Využití

Násobič napětí se využívá jako levná a malá náhražka za transformátor tam, kde byl třeba jen malý odběr proudu o vysokém napětí. Příkladem mohou být televizory, které používají násobič napětí jako zdroj předpětí pro obrazovku. Násobiče se používají v mnoha oblastech techniky, zejména pro elektrické laserové a iontové pumpy, zdroje vysokého napětí X-ray systém, elektrostatické systémy, ionizátory vzduchů,

urychlovače částic, kopírky, osciloskopy, televizory a v mnoha dalších aplikacích, kde je třeba konstantně vysoké napětí s malým proudem na **Obr. 3.2.** [8]

Napěťový násobič se využívá rovněž ve fyzice a všude tam kde je třeba jednoduše vyrobít stejnosměrné vysoké napětí, protože zajišťuje výhodné prostorové rozložení napětí.



Obr. 3.2: Příklady realizace násobičů napětí v běžných spotřebičích [8]

3.3. Komponenty napěťového násobiče u napájecího zdroje pro elektronové mikroskopy

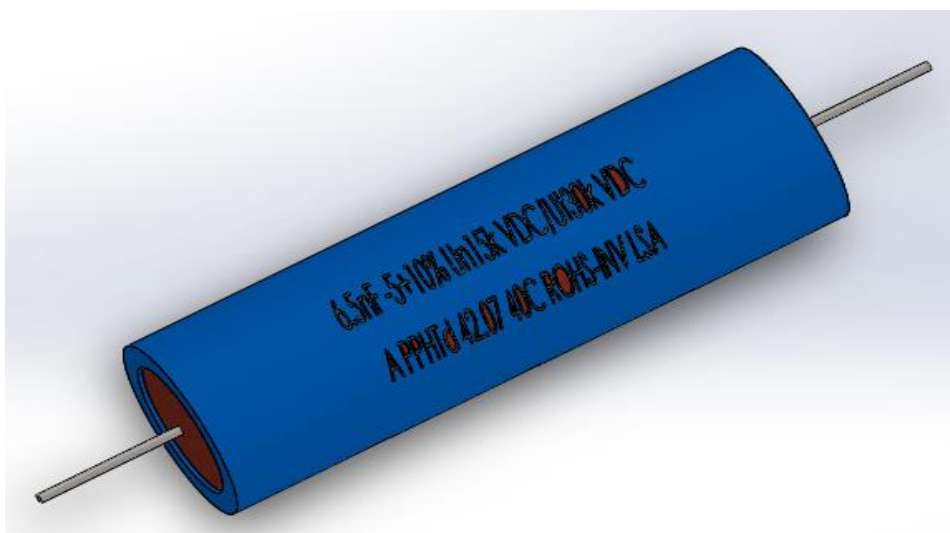
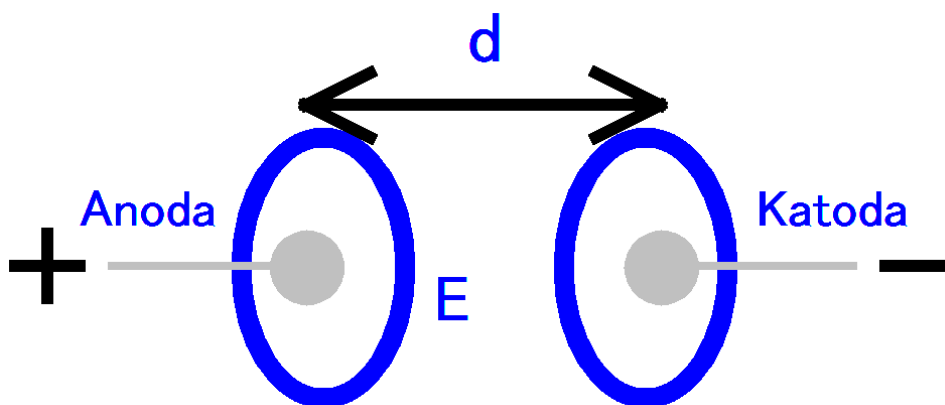
Hlavními komponenty vysokonapěťového násobiče, které nás zajímá, jsou vysokonapěťový kondenzátor a usměrňovací dioda, o kterých budeme mluvit v další části diplomové práce. Budou dále popsány hlavní parametry vysokonapěťového kondenzátoru a usměrňovací diody v **Tab. 1 a 2.**

3.3.1. Vysokonapět'ový kondenzátor

Komponent, který nás zajímá a který budeme zkoumat je vysokonapět'ový fóliový kondenzátor. Je nejdůležitější součástí napět'ového násobiče, používaného u napájecího zdroje pro elektronové mikroskopy. Dále popíšeme jeho základní vlastnosti a charakteristiky.

Jak víme, kondenzátor je základní pasivní elektronická součástka, která je používána téměř ve všech elektrických obvodech. Základním principem využití je uchování elektrického náboje. Velikost uchovaného náboje závisí na překrývající se oblasti desek a vzdálenost mezi nimi, stejně jako na vlastnostech použitého dielektrika. Čím větší je plocha překrytí desek (S) a v menší vzdálenost mezi nimi (d), tím větší je kapacita (C). Pak závisí na druhu kondenzátoru, respektive dielektriku a jeho složení a napětí. [12]

Zjednodušíme-li si pohled na kondenzátor, jedná se v principu o dvě vodivé desky o plochách S (elektrody), jsou od sebe odděleny dielektrikem (elektroizolačním materiálem) o permitivitě E ve vzdálenosti d na **Obr. 3.3**.

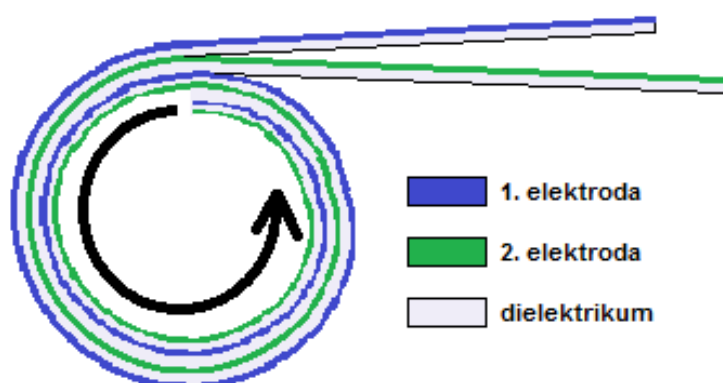




Obr. 3.3: Fóliový vysokonapěťový kondenzátor s vlastními parametry.

Kondenzátory pro výkonovou elektroniku, definuje kondenzátorový svitek, který můžeme definovat jako dvě a více elektrod, oddělených dielektrikem, navinutých do tvaru svitka na **Obr. 3.4**.

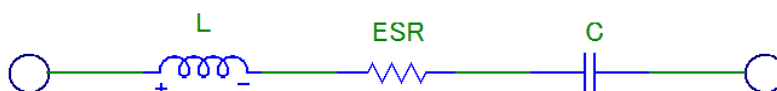
Rozměry jsou pak závislé na požadovaném napětí a kapacitě kondenzátoru.



Obr. 3.4: Svitkový kondenzátor [12]

Každý kondenzátorový svitek má vnitřní jedno-sériové zapojení a prakticky můžeme rozdělit na nekonečné množství sérioparalelních spojení RLC prvků.

V praxi se dnes používá zjednodušené náhradní schéma kondenzátorů pro průběh střídavého proudu s *ESR* (ekvivalentní sériový odpor kondenzátoru) na **Obr. 3.5**. Zde nalezneme indukčnost L [H], vyjadřující induktivnímu připojovacích drátů a spojení (pro nás je zanedbatelná) a vlastní kapacitu kondenzátoru C .



Obr. 3.5: Náhradní schéma reálného svitkového kondenzátoru [12]

Svitkový kondenzátor má polypropylenovou fólii, na které je napařena slabá vodivá vrstva kovu, převážně zinku, nebo hliníku. Vzhledem k tomu, že čistý zinek neulpívá dobře na polypropylenové fólii, je pokovení buď to v jednom kroku směsicí 95 % zinku

a 5 % hliníku (tzv. *Alloy*), nebo ve dvou krocích, přičemž v prvním kroku se nejprve nanáší slabá vrstva stříbra a následně se napařuje zinková vrstva **Obr. 3.6**.




Obr. 3.6: Řez pokovenou polypropylenovou fólií [12]

Tento proces se provádí pod vakuem a k dobré přilnavosti a přenosu par kovů se využívá elektrostatického napětí. Vrstva nanášené metalizace je řádově desítky nanometrů. Polypropylenové fólie se pak používají řádově jednotky mikrometru silné.

Jedním z hlavních vlastností fóliového kondenzátoru je samo regenerace, její základní vlastností je, v případě průrazu odizolovat dvě elektrody o různém potenciálu a tím udržet kondenzátor dále provozuschopný bez výrazné změny kapacity nebo ztrátového činitele $\tan \delta$.

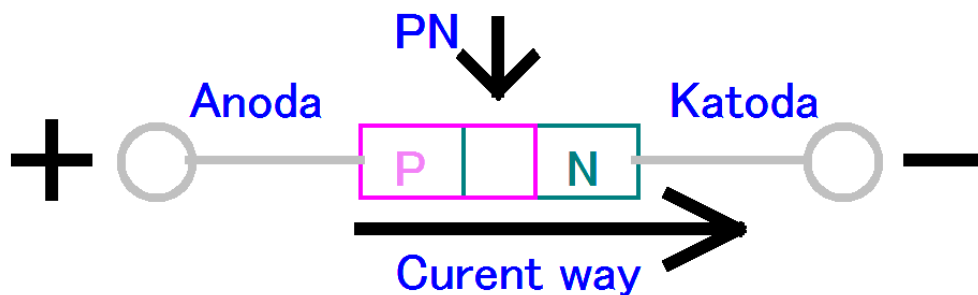
Parametry fóliového vysokonapětového kondenzátoru jsou v **Tab. 1**.

Fóliový vysokonapětový kondenzátor	
	
$\tan \delta [-]$	0,002
$U_{max} [V]$	20 kV
$C [nF]$	6,5 nF
$I [\mu A]$	250-300 μA

Tab. 1: Parametry fóliového vysokonapětového kondenzátoru

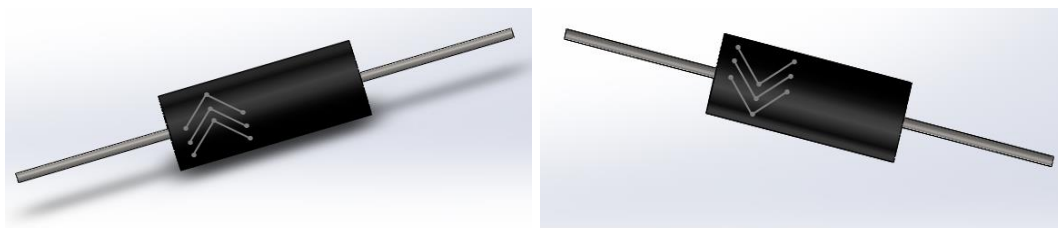
3.3.2. Usměrňovací dioda

Další důležitou součástíku násobiče je usměrňovací dioda na **Obr. 3.7**.



Curent way – směr proudu;

PN přechod – pozitiv – negativ přechod.



Obr. 3.7: Usměrňovací dioda napětového násobiče

Velmi rozšířená aplikace přechodu *PN* je usměrňovací dioda. Je to dioda, při polaritě přiloženého napětí v propustném směru proud diodou teče a v opačné polaritě je proud diodou velmi malý a často se dá zanedbat, to znamená, že využívá vlastnosti přechodu *PN*. Podle výkonu, který usměrňujeme, dělíme usměrňovače na výkonové usměrňovače a na usměrňovače relativně malého výkonu. Frekvence, se kterou pracuje výkonový usměrňovač, se může pohybovat od desítek Hz (velmi často síťový kmitočet, tj. 50 Hz) až do desítek kHz (spínací zdroje do PC např. pracují na kmitočtech okolo 30 kHz). Čím je vyšší kmitočet, který má dioda usměrňovat, tím menší musí mít kapacitu použitý *PN* přechod. [13], [14], [15]

V praxi nemůžeme použít libovolnou diodu k usměrňování a tak je potřeba formulovat základní parametry diod v **Tab. 2**.

Usměrňovací dioda	
	
U_R [V]	20 kV
I_{max} [A]	200 μA
U_d [V]	0.6-0.65 V

Tab. 2: Parametry usměrňovací diody

4. TEORETICKÉ MOŽNOSTI MĚŘENÍ KVALITY KONDENZÁTORŮ V NAPĚŤOVÝCH NÁSOBIČÍCH

V této části diplomové práce budou popsane teoretické možnosti provádění zkoušek, které můžeme použít během měření kvality kondenzátorů galvanickou metodou. Obvykle se používá výdržné stejnosměrné a střídavé zkoušky kondenzátorů při 1,5 až 2 U_n , o kterých bude popsáno dále. Tyto zkoušky dává možnost zjištění maximální hodnoty napětí, tím můžeme simulovat podmínky urychleného stárnutí, který nám umožní následně zjištění, v jakém stavu se nachází izolace kondenzátoru.

Budou popsane možnosti měření ztrátového činitele $\tan \delta$ v závislosti na napětí do 1,5 U_n a jeho naměřená hodnota u kondenzátorů vypovídá o kvalitě izolačního dielektrika. Měření probíhá při maximální provozní efektivní hodnotě střídavého napětí průmyslového kmitočtu nebo hodnotě zvýšené, také se dá použít snížení frekvence do 0,2 Hz, při snížení frekvence je citlivost a přesnost měření výrazně vyšší.

4.1. Výdržné stejnosměrné a střídavé zkoušky kondenzátorů (minutová a hodinová zkoušky) při 1,5 až 2 U_n

Nejčastěji prováděnou zkouškou ve zkušebnách je zkouška střídavým napětím průmyslového kmitočtu 50/60 Hz. U zkoušených objektů během testu jsou simulovány podmínky krátkodobého přechodného i trvalého zvýšení napětí.

Výdržnou zkoušku střídavým napětím průmyslového kmitočtu lze rozdělit na dva druhy. První zkouškou je krátkodobá výdržná zkouška nebo minutová výdržná zkouška, v průběhu této zkoušky je na zkoušený předmět přivedeno střídavé napětí o efektivní hodnotě 2 až 2,5krát vyšší, než maximální napěťová hladina, na kterou zkoušený předmět byl vyroben. Výsledkem zkoušky je, když u zařízení nedošlo k ovlivnění jeho funkce nebo k přeskoku ani k průrazu. [8]

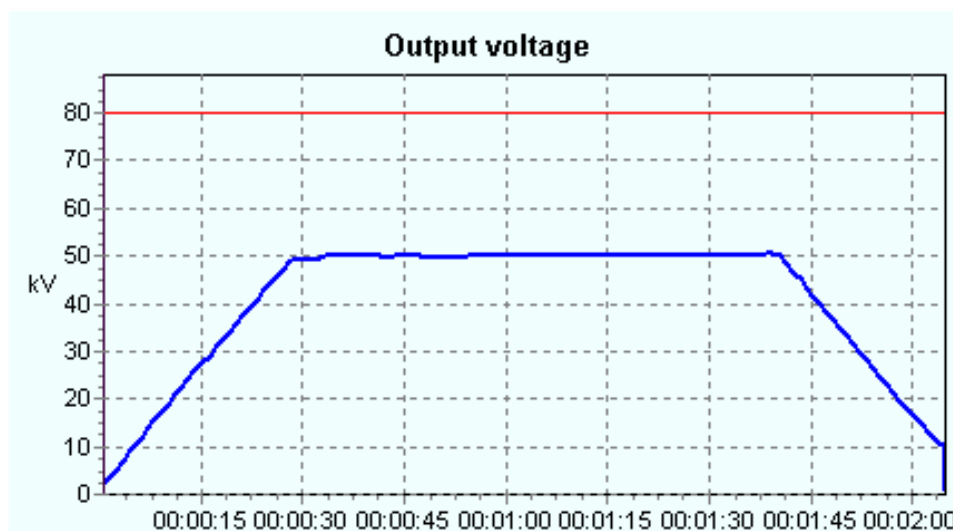
Příklady zkušebních napětí pro testování izolátorů, transformátorů a průchodek jsou uvedeny v **Tab. 3**.

Nejvyšší napětí pro zařízení (kV)	Zkušební napětí – efektivní hodnota (kV)
7.2 (jmenovité 6.3)	20
12 (jmenovité 10)	28
25 (jmenovité 22)	50
38.5 (jmenovité 35)	70
123 (jmenovité 110)	230
245 (jmenovité 220)	360; 395; 460
420 (jmenovité 400)	850; 950; 1050
800 (jmenovité 750)	1300; 1425; 1550

Tab. 3: Normalizované krátkodobé výdržné napětí síťového kmitočtu [8]

Při testování kondenzátorů krátkodobou výdržnou zkouškou mohou být efektivní zkušební napětí rozdílná. Zkušební napětí je nutné na zkoušeném objektu postupně zvyšovat rychlostí 1 kV/s, 2 kV/s, 5 kV/s nebo 10 kV/s tak, aby maximální hodnoty bylo docíleno mezi 10 a 30 s po zapnutí testovacího zdroje. Po uplynutí minutové zkoušky plného napětí na testovaném kondenzátoru je doporučeno toto napětí postupně snížit a potom napájecí zdroj vypnout. [8]

Do protokolu se uvádí časový průběh testovacího napětí. Příklad je uveden na **Obr. 4.1**.



Obr. 4.1: Časový průběh testovacího napětí u krátkodobé výdržné zkoušky střídavým napětím průmyslového kmitočtu [8]

Druhým typem výdržné zkoušky střídavým napětím jsou zkoušky dlouhodobé, které při zvýšených testovacích napětích simulují dlouhodobá přepětí. Zkoušky jsou prováděny po dobu patnácti minut, jedné hodiny a v některých případech až čtyř hodin nebo dvaceti čtyř

hodin. Velikost efektivní hodnoty je dána národní nebo podnikovou normou a je zpravidla nižší, než napětí použité při minutové zkoušce a pomocí tohoto způsobu v kombinaci s klimatickým a mechanickým namáháním jsou simulovány další podmínky urychleného stárnutí, například u vysokonapěťových kondenzátorů.

Výdržná zkouška přiloženým stejnosměrným napětím je prováděna obdobným způsobem, jako výdržná zkouška střídavým napětím průmyslového kmitočtu. Nejčastěji jsou prováděny minutové a patnácti minutové zkoušky pro obě polarit. Výsledkem zkoušky je stav, že nevznikne na zkoušeném objektu vnější přeskok ani průraz a funkce objektu se nezmění během působení přiloženého vysokého napětí obou dvou polarit. [8]

Minutová výdržná zkouška stejnosměrným napětím je v průmyslu používána pro testování *NN* kondenzátorů zkušebním napětím 2 kV *DC* nebo pro testování elektronických komponentů s galvanickým oddělením.

Při stejnosměrném namáhání dielektrika dochází k rychlému a částečně i pomalému natáčení dipólů. Uskladněný náboj je možná po ukončení testů odvést, v praxi to provádí pomocí vybitím, nebo případně dotykem uzemňovací tyče na povrch testovaných objektů. Ale problé je v tom, že u testovaných objektů, především kondenzátorů, i při okamžitém vybití dochází časem k částečnému obnovení náboje a vzniku možného nebezpečného dotykového napětí na výstupních elektrodách. Proto je nutné všem tyto vlastnosti vykazujícím objektům po ukončení testů trvale zkratovat výstupní kontakty a galvanicky je spojit se stíněním nebo obalem. [8]

4.2. Měření ztrátového činitele ($\tan \delta$) v závislosti na napětí do $1,5 U_n$

Každý technický izolant má nenulovou elektrickou vodivost, obsahuje nečistoty, příměsi a přiložené elektrické pole podmiňuje vznik nestacionárních přesunů uvnitř dielektrika. To vede ke ztrátám energie v dielektriku při vložení materiálu do elektrického pole. Ztráty se vyskytují při působení střídavého a stejnosměrného elektrického pole a způsobí zahřívání dielektrika, ale také jsou i příčinou změny fázového úhlu mezi napětím a proudem. V dielektriku působí několik druhů ztrát, které jsou rozdílné svým fyzikálním základem.

Tyto ztráty se navzájem sčítají. Veličiny dielektrických ztrát jsou: [16]

- ztrátový úhel (δ);
- ztrátový činitel ($\tan \delta$);
- ztrátové číslo ($\varepsilon'' = \varepsilon' \tan \delta$);
- měrné dielektrické ztráty (ztrátový výkon P_Z vztažený na jednotku objemu látky).

Nejdůležitější veličinou z výše uvedených je ztrátový činitel ($\tan \delta$). Hlavní faktory, ovlivňující ztrátový činitel, jsou: [16]

- teplota;
- kmitočet přiloženého elektrického pole.

Izolanty, které za pokojové teploty dosahují hodnoty ztrátového činitele $\tan \delta > 10^{-2}$, jsou považovány za kvalitní. Izolace kondenzátorů přirozeně stárne. Stárnutí izolace znamená omezení izolačních schopností, snížení izolačního odporu a následně zvětšení ztrátového činitele $\tan \delta$.

Pro zjištění kvality silových kondenzátorů používají stejnosměrné napěťové zkušební zdroje, kde měřítkem kvality zkoušeného kondenzátoru je měřený stejnosměrný činný svodový proud. Pomocí stejnosměrnou napěťovou zkouškou můžeme odhalit hrubé defekty a naopak můžeme způsobit výpadek nevhodným elektrickým namáháním izolace kondenzátorů nebo kabelů, které jsou určeny pro provoz na střídavých systémech 50 Hz. Bylo dokázáno, že stejnosměrné napěťové zkoušky silových kondenzátorů z polymerů mohou vyvolat v pevném dielektriku polymerů prostorový náboj, který může nesmazatelně ovlivnit životnost silového kondenzátoru. Z těchto důvodů se dnes užívá střídavých zdrojů o nízké frekvenci. [17]

V případě snížení frekvencí zkušebního napětí hodnota ztrátového činitele roste, proto se pro toto měření používá napětí o frekvenci 0,1 Hz. Užitím této nízké frekvence se podstatně usnadňuje měření ztrátového činitele. Ztrátový činitel $\tan \delta$ je důležitý parametr, protože ztráty vznikající v kondenzátorů způsobují jeho ohřev, který může vést při vysokých frekvencích až k destrukci dielektriku při vysokých ztrátách. [17]

Ztrátový úhel je tím větší, čím menší je izolační odpor. Izolační odpor u kondenzátorů s papírovou, impregnovanou izolací je většinou zmenšen vlivem stárnutí a dlouhodobého tepelného a elektrického namáhání.

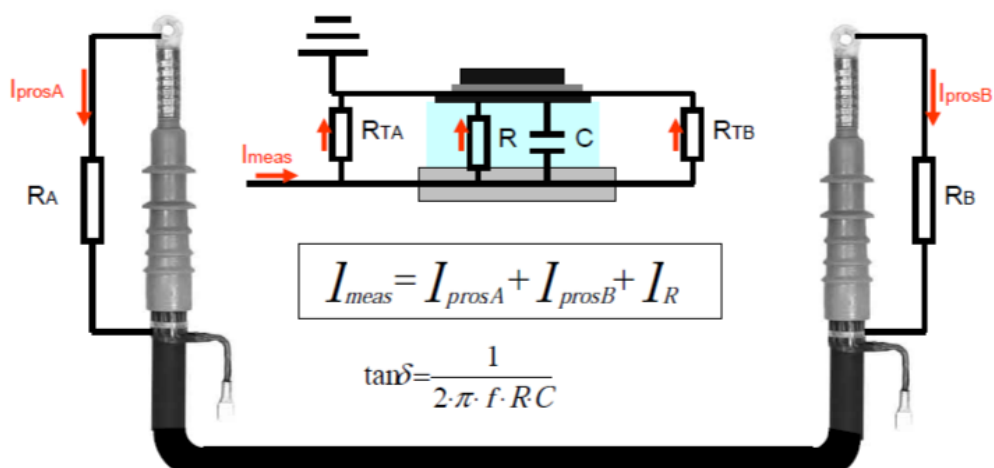
Dále popíšeme měřicí soustavu pro měření ztrátového činitele, která se skládá ze zdroje VN o přesné frekvenci 0,1 Hz, vyhodnocovací jednotky, kde zajišťuje možnost měření kapacity,

odporu, fázového posunu a výpočtu tangenty ztrátového úhlu a příslušného software, který má možnost nastavení testovacího napětí, počet kroků měření, vypočtení střední hodnoty, vykreslení grafu a dle zadaných parametrů tisk protokolu s celkovým hodnocením zkoušeného kondenzátoru. [17]

Měření probíhá ve třech krocích po osmi měřeních. Začíná se na hodnotě testovacího napětí U_0 , po změření osmi vzorků se průměr z těchto hodnot se střední odchylkou uloží a pokračuje měření testovacím napětím $1,5U_0$.

Po ukončení měření se provede vyhodnocení, podle kterého lze ihned posoudit stav kondenzátoru.

Schéma principu měření ztrátového činitele $\tan \delta$ na **Obr. 4.2**.



Obr. 4.2: Princip měření ztrátového činitele [17]

Naměřená hodnota ztrátového činitele $\tan \delta$ u kondenzátorů vypovídá o kvalitě izolačního dielektrika. Měření probíhá při maximální provozní efektivní hodnotě střídavého napětí průmyslového kmitočtu nebo hodnotě zvýšené. Dnes se přistupuje k měření ztrátového činitele $\tan \delta$ u kondenzátorů všech napěťových úrovní při jednotné hodnotě 2 kV. Frekvence přiloženého napětí může být síťová 50/60 Hz nebo snižovaná 0,2 Hz, při snížení frekvenci je citlivost a přesnost měření výrazně vyšší, ale hlavně snížení kapacitního proudu na úkor svodu. Hodnota $\tan \delta$ se u většiny testovaných kondenzátorů pohybuje v řádech 10^{-4} až 10^{-3} . Ideální je, když se hodnota ztrátového činitele $\tan \delta$ s nárůstem napětí nemění.

4.3. Částečné výboje – výhody, nevýhody měření kvality kondenzátorů v napěťových násobičích

Mezi výhody měření kvality kondenzátorů galvanickou metodou patří:

- Metoda má velké praktické zkušenosti;
- velká citlivost měření díky možnosti regulace vazební kapacity;
- lze zjistit velikost náboje uvolněného při výboji;
- lze určit typ výbojů;
- možnost pro on-line monitoringu.

Mezi nevýhody patří:

- Nemožnost měření komponentu v obvodu;
- nutná eliminace koróny;
- nelze použít k lokalizaci výbojů;
- rušivé vlivy jako, např. vlivy elektromagnetických vln rádiových vysílačů nebo rušení impulsního charakteru mají vliv na konečný výsledek měření;
- v porovnání s ostatními metodami je drahá.

5. HIPOTRONICS DDX – 8003 PULSE DISCRIMINATION SYSTEM

Technické parametry, princip činnosti, hlavní funkce a obrázky počítačového programu přístroje HIPOTRONICS DDX-8003 Pulse Discrimination System je z instrukce. [9]

HIPOTRONICS DDX-8003 Digital Partial Discharge Detector na rozdíl od HIPOTRONICS DDX-7000 (**kap. 6.3**) má systém s pulzní discriminací vnějších vlivů. Je počítačově ovládaný digitální měřicí přístroj pro měření výbojové činnosti. Pomocí toho přístroje můžeme snímat signály generované vybojovou činností z testovaného objektu a zpracovává je tak, abychom mohli ty signály měřit a zobrazit. Navíc je přístroj také vybaven zařízeními pro měření přiloženého vysokého napětí a pro vytváření kalibračních signálů. Částečné výboje u toho přístroje jsou měřeny galvanickou metodou (viz **kap. 2.1**).

HIPOTRONICS DDX-8003 má stejné použití, technické parametry jako u HIPOTRONICS DDX-7000, které budeme popisovat v **kap. 6.3.1**.

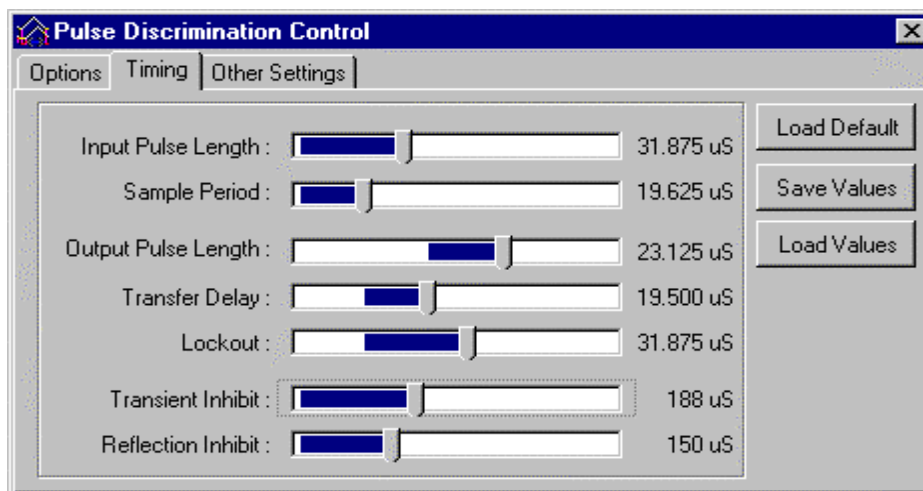
V této kapitole více je zaměřeno na pulzním diskriminačním systému, jsou popsány různé možnosti nastavení systému, které budou používány během samotných zkoušek.

5.1. *Pulzní diskriminační systém (Pulse Discrimination System)*

Hlavní výhodou DDX-8003 je to, že ten přístroj zahrnuje v sobě pulzní diskriminační systém. V této kapitole je popsáno jak nastavit pulzní diskriminační systém v jednotlivých blocích a okenkách v počítačovém programu.

5.1.1. Nastavení PDS

Okenko **Nastavení PDS** pro uživatele dává možnost zajištění různých typů nastavení pro PSD modulu v DDX-8003 systému. Má v sobě tři parametry, každý z nich má určitou funkci PDS systému (**Obr. 5.1**).

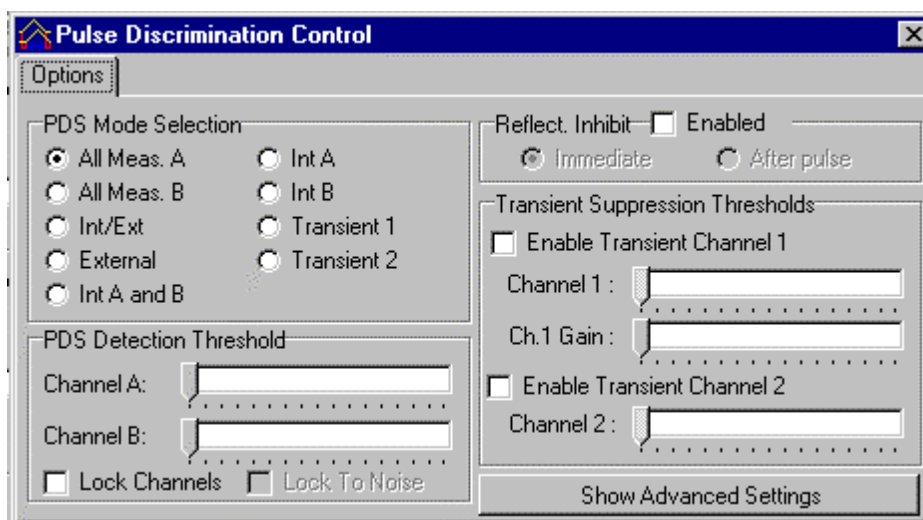


Obr. 5.1: Nastavení PDS

- **Options Tab** – je jeden z použitelnějších nástrojů pro nastavení vlastností PDS.
- **Timing Tab** – možnost nastavení časů PDS systému.
- **Others Settings** – používá se inženýři z oficiální komise Hipotronics.

5.1.2. PDS okenko Možnosti

Okenko **Možnosti** je nejpoužitelnější nástroj PDS. Na **Obr. 5.2** je vidět dialogové okenko.



Obr. 5.2: Okenko nastavení Možnosti

Dále popíšeme jednotlivé výběrové nastavení, které nám napomůže sledovat měření.

Výběr	Vstupní zdroj B	Kanal zachycení	PDS režim	Popis
<i>All meas. A</i>	<i>Channel B</i>	<i>Channel A</i>	Umožnění všech měření	Sledování všech měření, nic se ne blokuje
<i>All meas. B</i>	<i>Channel B</i>	<i>Channel B</i>	Umožnění všech měření	Sledování všech měření, nic se ne blokuje
<i>Int/Ext</i>	<i>Channel B</i>	<i>Channel A</i>	Vnitřní/Vnější impulsy	Měření pouze vnitřních/vnějších impulzů
<i>External</i>	<i>Channel B</i>	<i>Channel A</i>	Vnější impulsy	Měření pouze vnějších impulzů
<i>Int A or B</i>	<i>Channel B</i>	<i>Channel A</i>	Vnitřní A nebo B impulsy	Měření pouze vnitřních A nebo B impulzů
<i>Int A</i>	<i>Channel B</i>	<i>Channel A</i>	Vnitřní A impulsy	Měření pouze vnitřních A impulzů
<i>Int B</i>	<i>Channel B</i>	<i>Channel A</i>	Vnitřní B impulsy	Měření pouze vnitřních B impulzů
<i>Transient 1</i>	<i>Channel C</i>	<i>Channel B</i>	Umožnění všech měření	Přechodné. Sledování všech měření, nic se ne blokuje
<i>Transient 2</i>	<i>Channel D</i>	<i>Channel B</i>	Umožnění všech měření	Přechodné. Sledování všech měření, nic se ne blokuje

Tab. 4: Nastavení PDS v okenku **Možnosti**

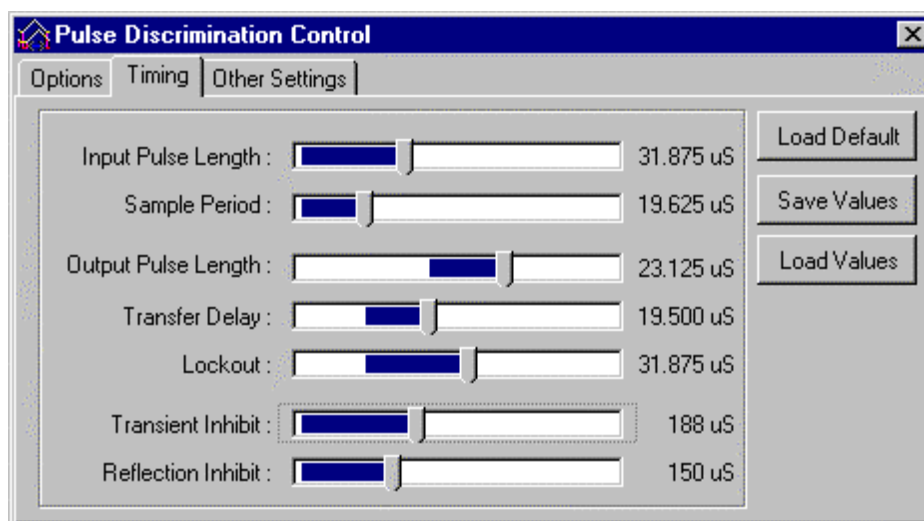
PDS Detection Threshold Sliders (Prahové posuvníky) – dva posuvníky se umožní pro uživatele zvolit prahovou hladinu napětí pro jednotlivé kanály, při kterém se měření částečných výbojů zaznamenávají. Takže můžeme pohybovat těmi posuvníky společně přes tlačítko *Lock Channels*.

Reflection Inhibit Enabled (Blokování odrazu Povolen/Zakázáno) – to dává možnost uživateli Povolit/Zakázat blokování odrazu. V případě, že odraz blokování je povoleno, uživatel má také možnost vybrat okamžité nebo blokování odrazy od impulzů.

Transient Suppression Thresholds (Přechodné práhové potlačení) – ty poskytují uživateli možnost povolit nebo zakázat dva typy práhové potlačení. Jedná se o dva samostatné a nezávislé vstupy, které mohou být používány s vlastním zesilovačem. Záměrem je, že pokud signál je detekován na jednom z nich a jeho funkce je aktivní, v tom případě, měřicí systém bude zabránovat měření jakéhokoli impulzů, které se budou vyskytovat v průběhu jejich časové periody.

5.1.3. PDS nastavení okenko Časové periody

Nastavení **Časové periody** poskytují pro uživatele možnost modifikovat události pro DDX-8003 PDS modulu na **Obr. 5.3**.



Obr. 5.3: Okenko nastavení **Časové periody**

V případě, že uživatel zkoumá schéma, je vidět, že některé intervaly nastavují souběžně nebo postupně navzájem. Podobným způsobem bude ovládací posuvník jezdit vlevo nebo vpravo automaticky, dle toho, jestli spustit jejich funkce současné nebo po sobě.

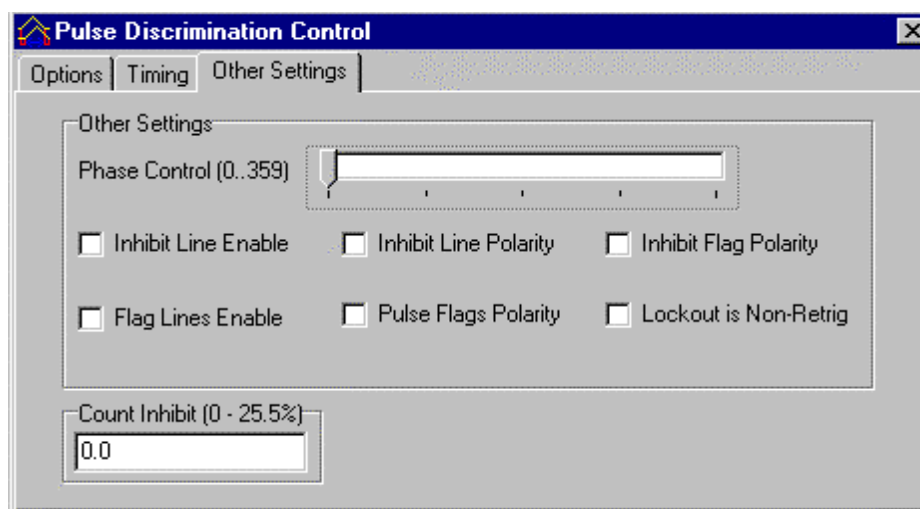
Pro první pět posuvníků, čas se zvyšuje v dobách 0.125 μ s a poslední dva přírůstkem času 2 μ s.

Parametry	Popis
<i>Input Pulse Lenght</i>	délka vstupního impulsu lze charakterizovat jako období, během kterého jsou veškeré spouštěné impulzy uloženy před dalším přechodem jiných obnovených impulsů Rozsah 0 – 31.875 μ se zvýšením 0.125 μ s.
<i>Sample Period</i>	časový interval mezi prvním přechodem impulsů a generování signálů na výstupu.
<i>Output Pulse Lenght</i>	povolí nastavení délky vystupního impulsu.
<i>Transfer Delay</i>	zpoždění přenesení impulsu mezi časového intervalu a vystupních impulsů.
<i>Lockout</i>	čas výluky, během této doby se žádné impulzy nebudou rozpoznány v PDS.
<i>Transient Inhibit</i>	přechodné zablokování umožňuje uživateli vybrat období, během kterého přechodové impulzy ignorované, pokud potlačení je zvoleno.
<i>Reflection Inhibit</i>	umožní uživateli vybrat období, během kterého dochází k blokování odrazu.

Tab. 5: Parametry nastavení Časové periody

5.1.4. PDS nastavení okenko Jiných možnosti nastavení.

Je méně použitelnější funkce v PDS na **Obr. 5.4**. Obvykle se používají komisi Hipotronics.



Obr. 5.4: Okenko nastavení **Jiných možnosti**

Phase Control (Nastavení Fáze) – aby bylo možné rozlišit mezi dvěma impulzy, z nichž se jeden vyskytují částečnými výboje a proto je to nutné vědet polaritu vstupního napětí a polaritu detekovaného signálu. Fázový referenční generátor pracuje se synchronizačním signálem v zadní rovině a může posunout svoji fázi v 1024 kroků od 0° do 360°. To umožňuje přepínání bodu mezi kanálů A a B, které mají být stanoveny v optimální poloze, kde vznik částečných výbojů pravděpodobný. Nastavení Fáze umožňuje uživatele nastavit tento úhel.

Dále kratce popíšeme jednotlivé možnosti nastavení v tom okenku.

Inhibit Line Enable (Blokování Čar Povoleno) – Povoleno/Zakázáno blokování čar.

Flag Lines Enable (Vlajkové Čary Povoleno) – Povoleno/Zakázano vlajkové čary.

Inhibit Line Polarity (Blokování Čar Polarity) – nastavení polaritu signálu v blokovací čáře.

Inhibit Flag Polarity (Blokování Vlajkové Polarity) – nastavení polaritu signálu v blokovací vlajce.

Pulse Flags Polarity (Impuls Vlajkové Polarity) – nastavení polaritu signálu v impulsu vlajky.

Lockout Is Non Retrig (Zamčení spoštění) – nastavení zamčení spouštění.

Count Inhibit (Blokování Spočítání) – hodnota může být nastavená mezi 0 a 25.5 %.

6. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Praktická část diplomové práce se zabývá návrhem a realizací laboratorní úlohy na problematiku měření ztrátového činitele $tg \delta$ a částečných výbojů v dielektriku vysokonapět'ových kondenzátorů.

V první části laboratorní úlohy bude popsáno měření ztrátového činitele $tg \delta$ pomocí galvanické metody s můstkovým zapojením, která nám pomůže číselně zjištit jak se chová izolaci kondenzátorů při změně napětí. Naměřená hodnota ztrátového činitele $tg \delta$ u kondenzátorů vypovídá o kvalitě izolačního stavu dielektrika.

Druhá část úlohy je zaměřena na vyzkoušení měření částečných výbojů pomocí galvanické metody s injektažním kondenzátorem C_i . Tato metoda zaměřuje na měření proudových impulzů I_{PD} , které se vyskytují v dielektriku kondenzátorů. Proudový impulz I_{PD} v testovaném objektu nám napovídá o vzniku uvnitř jeho struktury částečných výbojů.

Ve třetí části úlohy je zkouška měření napětí na výstupech každého stupně v kaskádu u napět'ových násobičích, v úloze jsou použity čtyř stupně a je možnost porovnávat naměřené výsledky s teoretickými dle vztahů (4). (**kap. 6.6**)

6.1. Zadání laboratorní úlohy

- 1) Seznámení s problematikou měření ztrátového činitele $tg \delta$ pomocí galvanické metody s můstkovým zapojením a přístrojem Tettex 2840.
 - a. Provedení měření ztrátového činitele $tg \delta$ na samotných vysonapět'ových kondenzátorů galvanickou metodou můstkovým zapojením s používáním kulových elektrod.
 - b. Nakreslení grafy závislosti ztrátového činitele $tg \delta$ a C_x [pF] na napětí U [kV] a statistické pomocí histogramu vyhodnocení naměřených výsledků.
- 2) Seznámení se s problematikou měření částečných výbojů v dielektriku kondenzátorů pomocí galvanické metody zapojením injektážního kondenzátoru C_i a s používáním kulových elektrod.
 - a. Provedení měření částečných výbojů na samotných vysokonapět'ových kondenzátorů galvanickou metodou zapojením injektážního kondenzátoru C_i a s používáním kulových elektrod.
 - b. Nakreslení grafy závislosti ztrátového činitele $tg \delta$ a C_x [pF] na napětí U [kV] a statistické pomocí histogramu vyhodnocení naměřených výsledků.

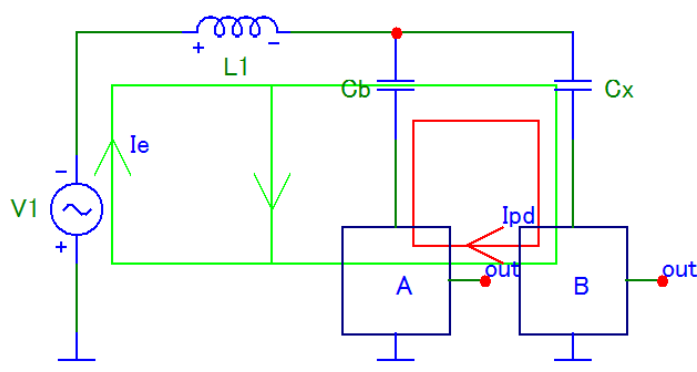
- 3) Měření účinnosti napětí na výstupech kaskádů v napěťových násobičích a porovnání praktické naměřené hodnoty s teoretickými hodnotami podle vztahů (4).

6.2. Galvanická metoda měření ztrátového činitele $\tan \delta$ můstkovým zapojením

Pro první zkoušku měření izolačního stavu dielektrika kondenzátoru je použita galvanická metoda můstkovým zapojením. Pomocí této metody je možné naměřit hodnotu ztrátového činitele $\tan \delta$, které nám pomůže zjistit, jak se chová izolace dielektriku v kondenzátorech během zvýšení zkušebního napětí U [kV].

V případě potřeby zvýšení citlivosti samotného měření ztrátového činitele $\tan \delta$ je možné využít diferenciálního můstkového zapojení. Tento systém je složitější na obsluhu, nicméně dává více možností provádět eliminaci vnějších rušení.

Schéma zapojení diferenciálního můstkového zapojení je uvedeno na **Obr. 6.1**.



Obr. 6.1: Diferenciální můstkové zapojení systému pro měření částečných výbojů [8]

C_b – blokovací kondenzátor;

C_x – měřený objekt;

I_{PD} – impulzní proud částečných výbojů;

I_e – proud z externích rušivých zdrojů;

A, B – přizpůsobovací jednotka (měřicí impedance).

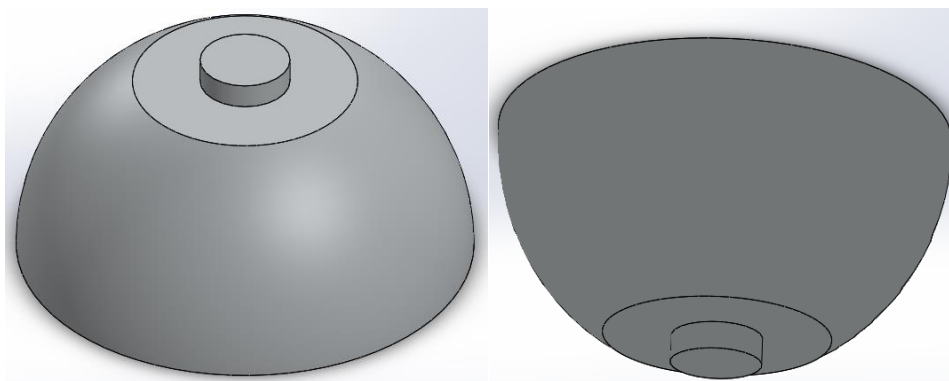
Zapojení využívá principu měření impulsů na dvou přizpůsobovacích jednotkách. První jednotka A je zapojena ve větvi blokovacího kondenzátoru C_b , druhá jednotka B ve větvi měřeného objektu C_x . Na měřicích jednotkách A a B sleduje polarita signálu v obvodech. Proudový impuls I_{PD} , který vzniká v měřeném objektu C_x znamená, že polarita naměřených impulsů oběma jednotkami zapojenými v měřené smyčce je odlišná a tím se jedná o vnitřní částečný výboj a to do konečného výsledku budou započteny. V opačném případě proudové impulsy z vnějšího rušivého zdroje, například z napájecího zdroje nebo okolních zařízení,

jsou naměřené polarity totožny, a tím se jedná o vnějším rušení a to nebudou započteno do konečného výsledku.

Velkou nevýhodou tohoto systému je nemožnost použít injektážní kondenzátor C_i pro kalibraci, kterou je třeba provádět pomocí ručního kalibrátoru a tím prodlužuje samotné měření. [8], [10]

V daném schématu měřený objekt C_x se skládá se z kondenzátoru a je uchopen mezi kulovými elektrody. Hlavní příčinou jsou použity kulové elektrody je vytvoření homogeního elektrického pole mezi elektrody kondenzátorů a kulových elektrod.

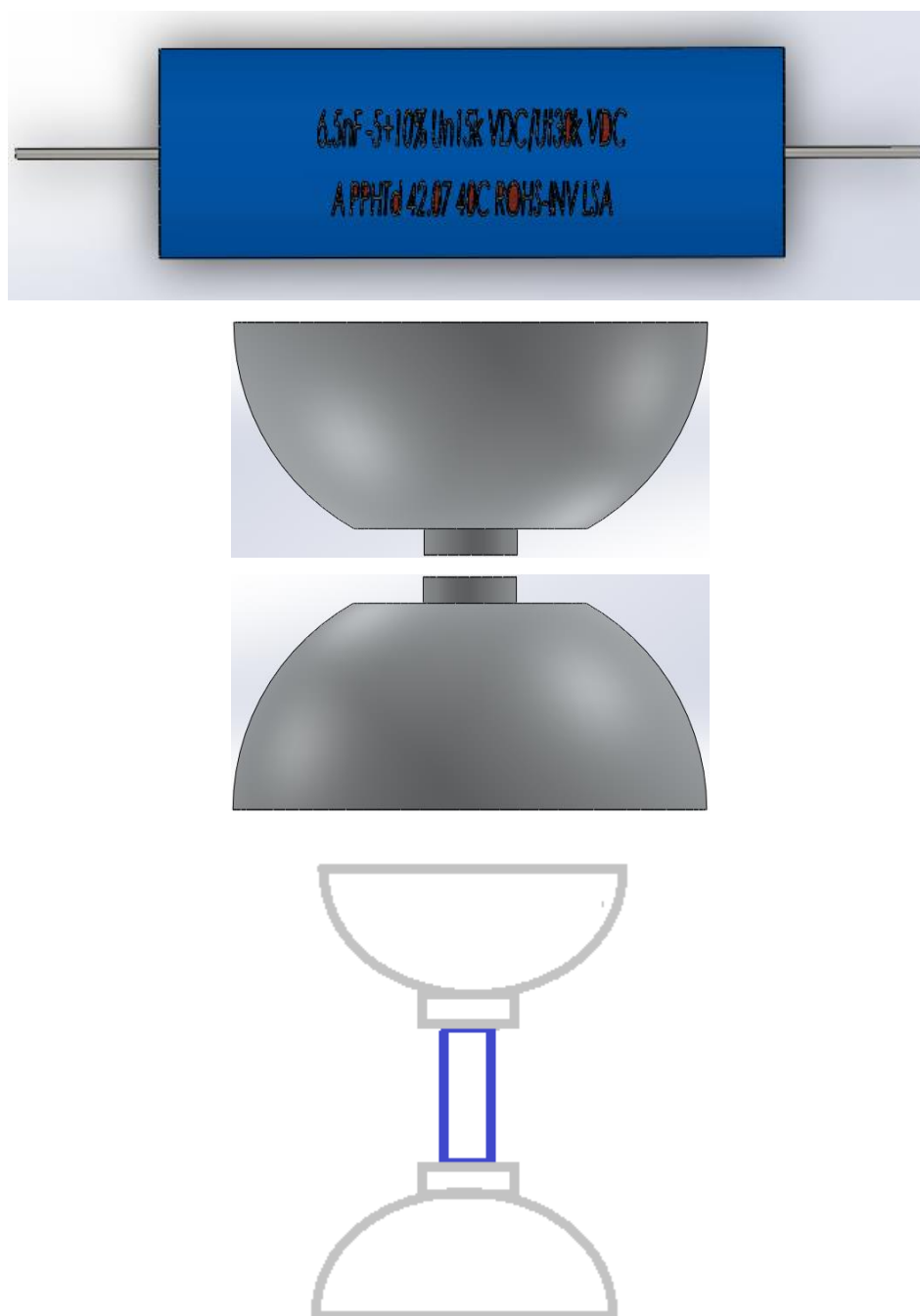
Tyto kulové elektrody jsou znázorněny na **Obr. 6.2**.



Obr. 6.2: Kulové elektrody

Během měření se může objevit koróna na elektrodách kondenzátorů a tím se zhorší naměřené výsledky. Samostatná koróna může vzniknout v homogením elektrickém poli a tím dochází k celkovému přeskoku mezi elektrodami najednou, co se týče nehomogeních polí tam dochází k optickým a akustickým projevům částečných výbojů před celkovým přeskokem. Tyto samostatné výboje jsou nazývány korónou. Je-li napětí na elektrodě větší než počáteční napětí koróny, obalí se elektroda s malým poloměrem svítící vrstvou, která je doprovázena zvukovými efekty (šum, praskání). Na vedení VN přístrojů je vznik koróny nežádoucí, protože koróna značně zvyšuje ztráty, které jsou závislé na podmínkách (teplota, tlak, vlhkost) a má rušivé účinky.

V daném schématu během zkoušky je použit návrh uchopení samotného kondenzátoru podle **Obr. 6.3** se svislou osou.



Obr. 6.3: Vysokonapět'ový kondenzátor, kulové elektrody a svislý způsob uchopení kondenzátoru mezi kulovými elektrodami v měřeném objektu

V daném případě pomocí kulových elektrod je možné zabránit kondenzátoru oproti koróně. Takovým způsobem je vytvořena podmínka homogeního elektrického pole, ve kterém proud při zvýšeném napětí procházejícím v izolantu kondenzátoru dává nám možnost zjištění reální hodnoty ztrátového činitele $\tan \delta$.

Každý izolant má nenulovou elektrickou vodivost, obsahuje nečistoty a přiložené elektrické pole podmiňuje vznik nestacionárních přesunů uvnitř dielektrika. To vede ke ztrátám energie v dielektriku při vložení materiálu do elektrického pole. Ztráty se vyskytují při působení střídavého a stejnosměrného elektrického pole a způsobí zahřívání dielektrika, ale také jsou i příčinou změny fázového úhlu mezi napětím a proudem. V dielektriku působí několik druhů ztrát, které jsou rozdílné svým fyzikálním základem, co vede k stárnutí izolace.

Stárnutí izolace znamená omezení izolačních schopností, snížení izolačního odporu a následně zvětšení ztrátového činitele $tg \delta$. Je důležitý parametr, protože ztráty vznikající v kondenzátorů způsobují jeho ohřev, který může vést při vysokých frekvencích až k destrukci dielektriku při vysokých ztrátách. [17]

Měření ztrátového činitele $tg \delta$ probíhá při maximální provozní efektivní hodnotě střídavého napětí průmyslového kmitočtu nebo hodnotě zvýšené. Dnes se přistupuje k měření ztrátového činitele $tg \delta$ u kondenzátorů všech napěťových úrovní při jednotné hodnotě 2 kV. Frekvence přiloženého napětí může být síťová 50/60 Hz nebo snižena 0,2 Hz, při snížení frekvence je citlivost a přesnost měření výrazně vyšší, ale hlavně snížení kapacitního proudu na úkor svodu. Hodnota $tg \delta$ se u většiny testovaných kondenzátorů pohybuje v řádech 10^{-4} až 10^{-3} . Ideální je, když se hodnota ztrátového činitele $tg \delta$ s nárůstem napětí nemění. Naměřená hodnota ztrátového činitele $tg \delta$ u kondenzátorů vypovídá o kvalitě izolačního stavu dielektrika.

6.2.1. Můstkový – metrický systém Tettex 2840

Technické parametry, princip činnosti, hlavní funkce a obrázky počítačového programu přístroje Tettex 2840 je z instrukce. [18]

Dále je vkratce seznámení se systémem Tettex 2840, pomocí kterého je vizuálně sledovat naměřené hodnoty změny různých parametrů a ty jsou pro nás nejdůležitější ztrátový činitel $tg \delta$, C_x [pF] na měřeném objektu při zvýšení zkušebního napětí U [kV]. Tento přístroj měří malé dielektrické ztráty a také se zahrnuje v sobě princip kombinace můstkové – vektorové – metrické, schopen analyzovat kapacitní a induktivní zátěží.

Technické parametry Tettex 2840

	Měřitelný rozsah	Maximální rozhlišení	Přesnost měření [%]
Ztrátový činitel $tg \delta$	$0 - 100$	$1 * 10^{-6}$	$\pm 0,5 \% \text{ rdg} \pm 1 * 10^{-5}$
Kapacita	$\geq 0,01 \text{ pF}$	$0,001 \text{ pF}$	$\pm 0,02 \% \text{ rdg} \pm 0,01 \text{ pF}$
Indukce	$\leq 1000 \text{ kH}$	$0,1 \text{ mH}$	$\pm 0,1 \% \text{ rdg} \pm 0,3 \text{ mH}$
Zkušební napětí	$5V - 1 \text{ MV}$	1 V	$\pm 0,2 \% \text{ rdg} \pm 1 \text{ V}$
Zkušební proud na výstupu C_b	$20 \mu A - 300 \text{ mA}$	$0,01 \mu A$	$\pm 0,1 \% \text{ rdg} \pm 0,1 \mu A$
Zkušební proud na výstupu C_x	$20 \mu A - 15 \text{ A}$	$0,01 \mu A$	$\pm 0,1 \% \text{ rdg} \pm 0,1 \mu A$
Frekvence	$15 - 1000 \text{ Hz}$	$0,01 \text{ Hz}$	$\pm 0,1 \% \text{ rdg} \pm 0,1 \text{ Hz}$
Testovací čas	$0,3 \text{ s}$		
Měřené jednotky	$2 (C_n \text{ a } C_x)$		
Teplota nastavení	$-10 - 50 \text{ } ^\circ\text{C}$		
Parametry	$115 \text{ VAC}/230 \text{ VAC}, 250 \text{ VA}, 50/60 \text{ Hz}, \text{ PFC}$		

Tab. 6: Technické parametry přístroje Tettex 2840

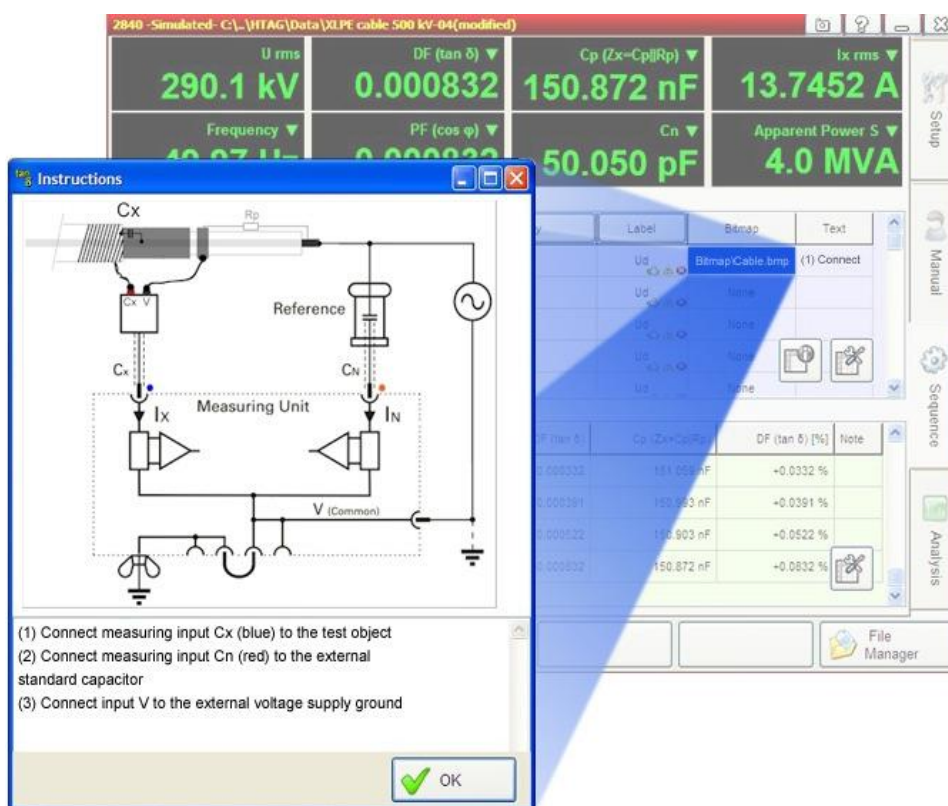
Na Obr. 6.4 je vidět samotný analyzační přístroj Tettex 2840.



Obr. 6.4: Tettex 2840

Ten systém má v sobě manuální a automatické režim testování. Manuální režim testování je zabezpečuje rychle měření, automotické režim testování podporuje automatickou posloupnost testování měřeného objektu. Tím systémem také umožní testování silových kabelů, pevné a kapalné dielektriky.

Systém má dotykovou obrazovku, pomocí které můžeme nastavovat, připravovat a testovat měřené objekty podle nastavovaných parametrů. Dotyková obrazovka a schéma zapojení je na **Obr. 6.5**.



Obr. 6.5: Schéma zapojení Tettex 2840 (vepředu) a dotyková obrazovka (vzadu)

Testování probíhá v následující posloupnosti:

- nastavení: druh měřeného objektu, druh dielektriku, změna teploty atd;
- nastavení požadované napět'ové hodnoty;
- nastavení potřebujemých sledovaných měřených hodnot: frekvence, ztrátový činitel $tg \delta$, proud, teplota dielektriku atd.

Analizační modul **Obr. 6.6** má grafickou obrazovku, na které je možné sledovat různé závislosti $\tan \delta$ na U [kV], C_x [pF] na U [kV], $\tan \delta$ na t [s] atd.



Obr. 6.6: Analizační grafický modul Tettex 2840

6.3. Galvanická metoda měření částečných výbojů s injektážním kondenzátorem

Druhou metodu pro zkoušku je používána galvanická metoda měření částečných výbojů s injektážním kondenzátorem C_i . Tato metoda dává možnost vyhodnotit izolační stav a kvalitu kondenzátoru pomocí naměřených hodnot proudových impulsů I_{PD} [pC].

Místo poruchy a jeho charakter můžeme lokalizovat z fáze naměřených impulsů a jejich intenzity. Vznik částečných výbojů a koróny je do principu prakticky stejný, a proto je velmi obtížné prakticky odlišit, ale částečné výboje obvykle vznikají uvnitř testovaných objektů, ve vnitřní struktuře pevném nebo kapalném dielektriku. Nejčastěji koróna vzniká u přírodních elektrod, na hrotech, nerovnostech a tenkých vodičích ve vzduchu. Po měření člověk má rozhodnout část naměřených impulsů s projevy koróny nezapočítávat do výsledné hodnoty naměřených částečných impulsů. [8]

Galvanická metoda používá jako vyhodnocovací parametr zdánlivý náboj q . Je to náboj, který je přiveden na svorky zkoušeného objektu a způsobí takovou změnu výchylky, kterou by způsobil vlastní proudový impuls částečného výboje. Zdánlivý náboj q se nerovná náboji působícího v místě výboje, který nemůže být přímo měřen. Udává se v jednotkách C, respektive pC. [4], [6]), který nelze přímo změřit.

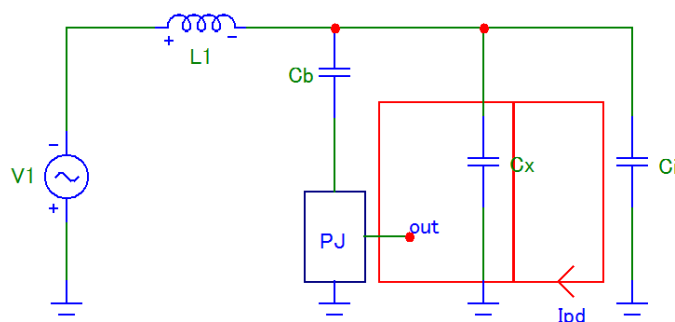
Proto se před samotným měřením provádí proces kalibrace obvodu, abychom mohli změřit odezvu měřicího obvodu na daný náboj, tím je možné porovnávat jednotlivá měření mezi sebou. Toto se provádí tak, že se daným přístrojem (kalibrátorem) injektuje do obvodu předem známý náboj a na zobrazovacím zařízení se sleduje výstupní signál. Podle této referenční úrovně se pak provádí přepočítání změřeného zdánlivého náboje q .

Při zpracování naměřených dat počet proudových impulzů neodpovídá fyzickému počtu poruch v testovaném objektu. Vznik jedné poruchy může způsobit více impulzů během periody. Čím je větší hodnota proudového impulsu I_{PD} , tím je větší pravděpodobnost vyskytu koróny nebo částečných výbojů v dielektriku kondenzátorů.

Během zkoušky do měřicího obvodu mohou vcházet rušení z vnějších objektů, a proto pro dosažení správných naměřených hodnot je nutně provést kalibraci systému, např. při každé změně zapojení, změně měřeného obvodu nebo nastavení měřicí jednotky. Tento účel splní injektážní kondenzátor C_i který je připojen paralelně s měřicím objektem C_x .

Pomocí injektážního kondenzátoru C_i do kterého z kalibrátoru jsou přiváděny impulzy známých vrcholových hodnot a v případě i znalosti velikosti injektážního kondenzátoru C_i je možné těmto impulzům přiřadit měřicím systém konkrétní hodnotu v pC.

Schéma zapojení obvodu s injektážním kondenzátorem C_i je uvedeno na **Obr. 6.7**.



Obr. 6.7: Schéma zapojení galvanické metody pro měření částečných výbojů s injektážním kondenzátorem [8]

C_b – blokovací kondenzátor;

C_x – měřený objekt;

C_i – injektážní kondenzátor;

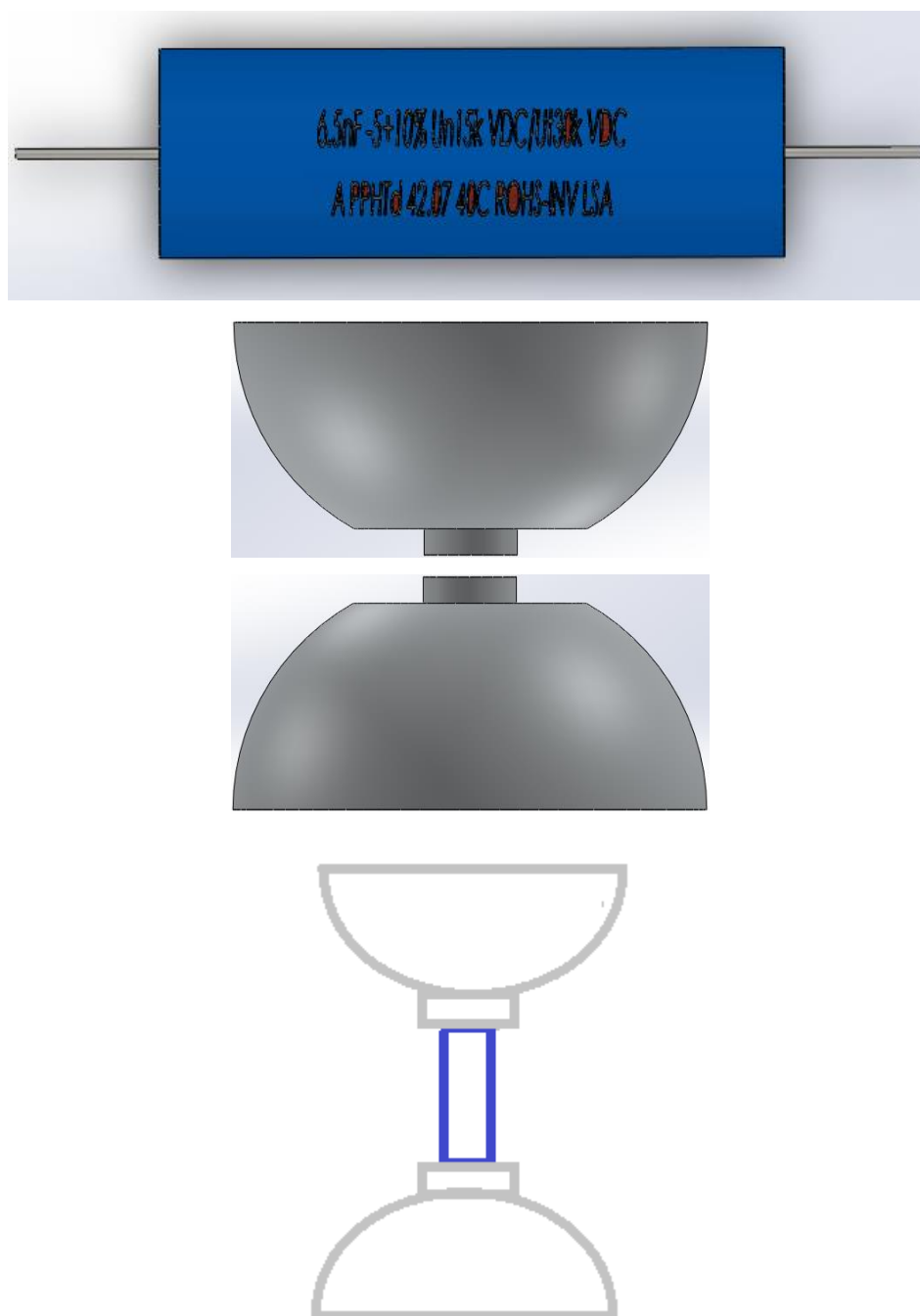
I_{PD} – impulzní proud částečných výbojů;

PJ – přizpůsobovací jednotka (měřicí impedance).

Nejvhodnější kalibrace je rychlá kalibrace, při které je měřicí systém schopen eliminovat periodicky opakovatelná rušení.

Vlastní zapojení měřicího objektu C_x je stejné jak v předchozí metodě s můstkovým zapojením.

Podle **Obr. 6.8** samotný kondenzátor je uchopen mezi elektrodami v zapojení se svislou osou.



Obr. 6.8: Vysokonapět'ový kondenzátor, kulové elektrody a svislý způsob uchopení kondenzátoru mezi kulovými elektrodami v měřeném objektu

Použití principu uchopení kondenzátoru mezi kulovými elektrodami, je tedy stejné jak v předchozí metodě je vytváření homogeního elektrického pole a tím zabránit koróně, která může ovlivnit naměřené výsledky proudových impulzů I_{PD} .

6.3.1. HIPOTRONICS DDX – 7000

Technické parametry, princip činnosti, hlavní funkce a obrázky počítačového programu přístroje HIPOTRONICS DDX-7000 jsou z instrukce. [9]

HIPOTRONICS DDX-7000 Digital Partial Discharge Detector je počítačové ovládaný digitální přístroj, který nám napomáhá měřit výbojové činnosti. Signály, které jsou generovány výbojovou činností z testovaného objektu pomocí DDX-7000 mohou být měřeny a zobrazeny. Částečné výboje nebo proudové impulsy I_{PD} toho přístroje jsou měřeny galvanickou metodou.

Použití

Obvykle přístrojem HIPOTRONICS DDX-7000 lze provádět testování izolace:

- výkonových kondenzátorů;
- výkonových kabelů;
- rozvaděčů;
- točivých strojů;
- transformátorů.

Parametry Hipotronics DDX-7000

Měřitelný rozsah ČV	<i>0 – 99999 pC</i>	
Rozlišení měření ČV	<i>9 znaků plus znaménko</i>	
Rozlišení fáze ČV	<i>0,35°</i>	
Měřicí rozsah napětí	<i>0 – 999999 V</i>	
Rozlišení měření napětí	<i>11 znaků plus znaménko</i>	
Rozsah zesilovače	<i>7 stupňů po 20dB rozsazích</i>	
Frekvenční rozsah	<i>20kHz – 500kHz</i>	
Frekvenční filtry	Dolní propust	<i>20 – 80kHz</i>
	Horní propust	<i>100 – 500kHz</i>
Napájení	<i>115V nebo 230V, 50Hz nebo 60Hz, <250VA</i>	
Rozměry	<i>270 x 445 x 460 mm (v x š x d), 18 kg</i>	
Provozní teplota	<i>10°C – 35°C</i>	

Tab. 7: Technické parametry přístroje DDX-7000

Popis zařízení

Měření částečných výbojů je ovlivňováno vnějším rušením. Měřený systém, který je používán pro měření proudových impulzů I_{PD} nabízí tři možnosti jak rušivé impulzy nezahrnout do měření:

- horizontální – lze zahradlovat nežádoucí signály, které se vyskytují na stále stejném místě měřeného průběhu;
- vertikální – dovoluje hradlovat impulzy, které jsou větší než nastavená hodnota;
- šumová zadřž – eliminace šumu měřicího systému.

Kalibrace systému je nutně provádět před každé změně konfigurace měřicího obvodu. DDX-7000 umožňuje dva způsoby kalibrace:

- automatický – minimální zásah uživatele a zajišťuje nejlepší kalibraci;
- manuální – případě kdy šum pozadí je velký.

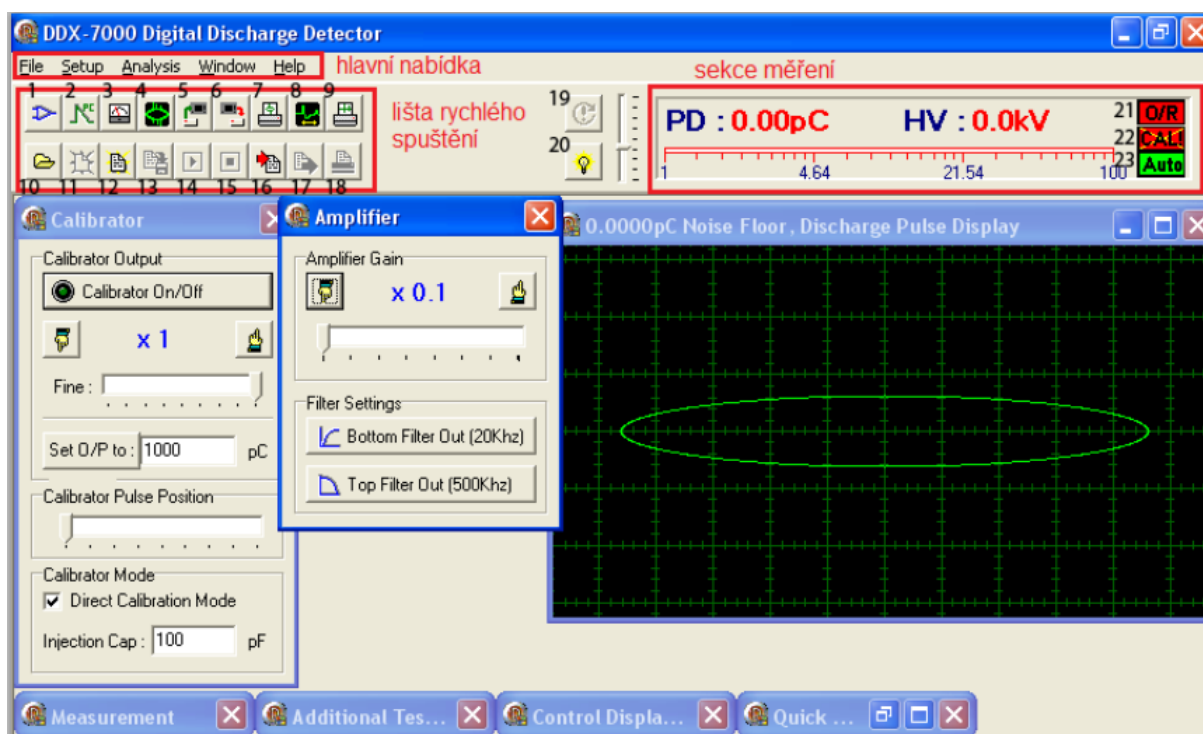
Pro naši zkoušku jsme nastavili hodnotu kalibrace 5 pC.

Popis programu DDX-7000

K nastavování přístroje a měření částečných výbojů respektive, proudových impulzů I_{PD} slouží počítačový program DDX-7000. Dalé v kratce jsou popsány základní možnosti nastavení programu a vysvětlení jednotlivých funkcí pro ovládání programu a nastavení měřicího přístroje.

Na **Obr. 6.9** je zobrazena úvodní obrazovka po jeho spuštění. Okenko vlastního programu lze rozdělit na několik funkčních částí:

- hlavní nabídka;
- menu rychlého spuštění;
- sekci samotného měření;
- část pro nastavení funkcí zesilovače, kalibrátoru a td.



Obr. 6.9: Úvodní obrazovka programu DDX-7000

Všechna nastavení programu a přístroje lze zvolit výběrem z hlavní nabídky, nepoužitelnější funkcí jsou umístěny do menu rychlého spuštění. Především v této liště se nacházejí funkce pro nastavení přístroje a pro práci s analýzou a naměřenými výsledky.

V sekci měření jsou zobrazeny informace o měření, jako je přiložení zkušební napětí, měřítko rozsahu zesilovače a úroveň částečných výbojů, proudových impulzů I_{PD} . Informace o překročení měřicího rozsahu a změně zesílení zesilovače (21), upozornění na nutnost zkalibrování měřicího systému (22) a automatické nastavení zesilovače během měření (23).

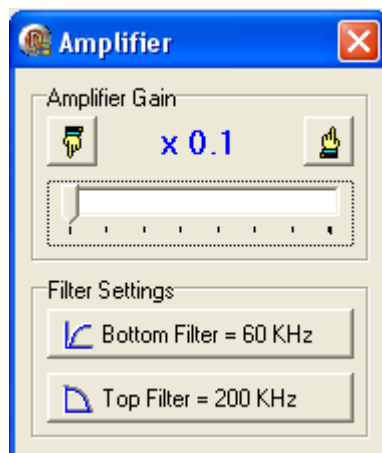
V **Tab. 8** jsou popsány významy jednotlivých tlačítek s číslováním dle **Obr. 6.9**.

Ozn.	Popis
1	<i>Nastavení zesilovače</i>
2	<i>Nastavení kalibrátoru</i>
3	<i>Nastavení měření</i>
4	<i>Nastavení zobrazení měřeného průběhu</i>
5	<i>Načtení uložené přístrojové konfigurace z disku</i>
6	<i>Uložení přístrojové konfigurace na disk</i>
7	<i>Tisk okna měřeného průběhu</i>
8	<i>PDSL – program pro lokalizaci poruchy</i>
9	<i>Tisk výsledků zobrazených v PDSL</i>
10	<i>Výběr druhu analýzy</i>
11	<i>Vymazání konfigurace současně zvolené analýzy</i>
12	<i>Načtení konfigurace analýzy z disku</i>
13	<i>Uložení konfigurace analýzy pro příští použití na disk</i>
14	<i>Spuštění vybrané analýzy</i>
15	<i>Ukončení probíhající analýzy</i>
16	<i>Uložení výsledků analýzy na disk</i>
17	<i>Načtení výsledků předchozí analýzy</i>
18	<i>Tisk posledních výsledků analýzy</i>
19	<i>Vymazání největší změřené hodnoty</i>
20	<i>Spuštění automatického nastavení systému</i>
21	<i>Upozornění na překročení měřicího rozsahu</i>
22	<i>Upozornění, že systém není kalibrovaný</i>
23	<i>Indikace automatického nastavování zesilovače</i>

Tab. 8: Popis programu DDX-7000

Nastavení zesilovače

Okno pro nastavení zesilovače je na **Obr. 6.10**.



Obr. 6.10: Nastavení zesilovače

Standardní zesilovač poskytuje širokopásmovou charakteristiku vhodnou pro měření aktivity částečných výbojů. Nabízí sedm rozsahů činnosti po 20 dB krocích (0 dB až 120 dB). Kromě toho nabízí jemné nastavení v 20 dB rozsazích, aby byla citlivost zesilovače optimalizována pro měření.

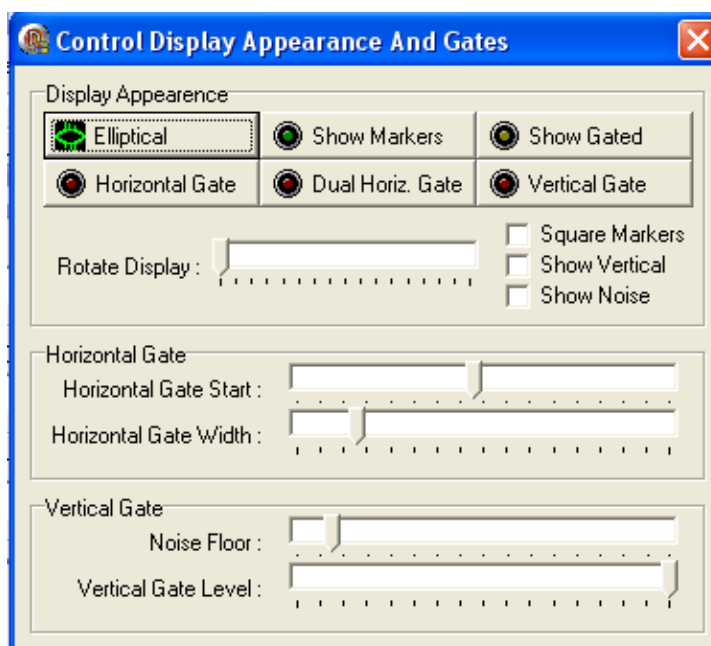
U tohoto přístroje lze nastavit nejnižší i maximální propustnou frekvenci. Pro naši zkoušku hodnoty minimální a maximální frekvenci je dle **Obr. 6.10**.

Bottom Filter – minimální propuštěná frekvence 60 kHz

Top Filter – maximální propuštěná frekvence 200 kHz

Nastavení zobrazování měřeného průběhu a hradel

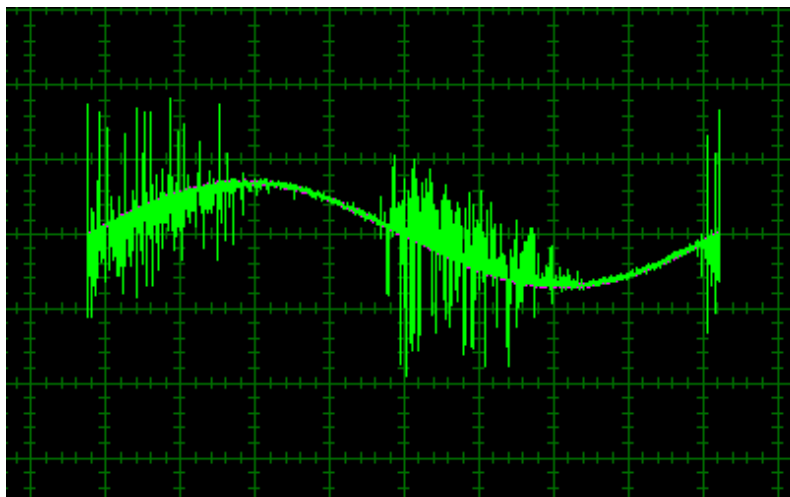
V okně Control Display Appearance And Gates **Obr. 6.11** se nastavuje způsob jakým průběh částečných výbojů je zobrazován.



Obr. 6.11: Nastavení zobrazení průběhu a hradel

Ze čtyř nabízených druhů průběhu, ty jsou: eliptický, lineární, sinusový průběhy a ve tvaru sinusové smyčky.

Pro naši zkoušku je zvolen sinusový průběh zobrazování **Obr. 6.12**.

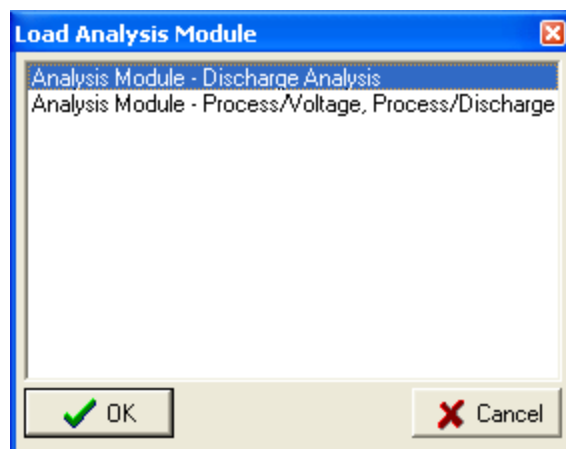


Obr. 6.12: Sinusový způsob zobrazení průběhu

Jednotlivé piky ukazují, že na sinusovém průběhu vyskyt částečných výbojů, respektive proudových impulzů I_{PD} které v počítačovém programu budou zobrazené v hodnotě [pC]. Z tohoto průběhu lze určit typ výboje dle **Tab. 10**.

Analyzační modul

Počítačový program dává na výběr zobrazení naměřených dat v jednom ze dvou analyzačních modulů **Discharge Analysis** a **Process/Voltage** (Obr. 6.13)



Obr. 6.13: Výběr analyzačního modulu

Discharge Analysis

Zobrazení naměřených hodnot v několika různých typech grafických závislostí je možné v analyzačním modulu Discharge Analysis. Na výběr je několik možných typů závislostí, z nichž u většiny je možná změna zobrazovaného parametru výboje (maximální hodnota, střední hodnota, energie, počet impulzů, atd.).

Process/Voltage, Process/Discharge

Tento analyzační modul umožňuje dva způsoby záznamu měření částečných výbojů. V prvním případě se jedná o závislost velikosti výbojů na přiloženém napětí, nebo ve druhém případě závislost velikosti výbojů v čase. Tento typ charakteristik lze nejlépe použít k vyhodnocení izolačního stavu zařízení srovnávací metodou.

6.4. Měření ztrátového činitele $tg \delta$ můstkovým zapojením

Postup měření bude probíhat v následujících krocích:

- připravení samotných vysokonapět'ových kondenzátorů;
- ke každému schématu a kondenzátoru na tomto schématu přiřazení pořádkové číslo;
- připravení zapojení kondenzátoru mezi kulovými elektrody dle **Obr. 6.1** a zkontrolování elektrického schématu galvanické metody s můstkovým zapojením dle **Obr. 6.2**;
- měření samotného kondenzátoru na zjištění hodnot ztrátového činitele $tg \delta$ a následně izolačního stavu kondenzátoru;
- vyhodnocení naměřených hodnot a nakreslení grafů závislosti ztrátového činitele $tg \delta$, kapacity kondenzátoru C_x na střídavém napětí $U_{stř}$;
- statistické vyhodnocení změny ztrátového činitele $tg \delta$ (kvality izolace) kondenzátorů při napětí $U_{stř}=4,03$ kV, 5,6 kV, 8,1 kV.

Vypracování laboratorní úlohy a naměřených hodnot

Před tím, než začít samotné měření kondenzátoru byly přiřazeny vlastní písmena ke každému schématu a jeho kondenzátoru, například schéma A, kondenzátor A1. Každé schéma má šest kondenzátorů, to znamená kondenzátor A1 – A6 apod s každým dalším schématem (B, C, D, E, F).

Podle datasheetu kondenzátoru maximální piková provozní hodnota napětí je 15 kV DC (stejnoseměrného napětí) nebo v rozsáhu 10,6 – 11 kV AC (střídavého napětí).

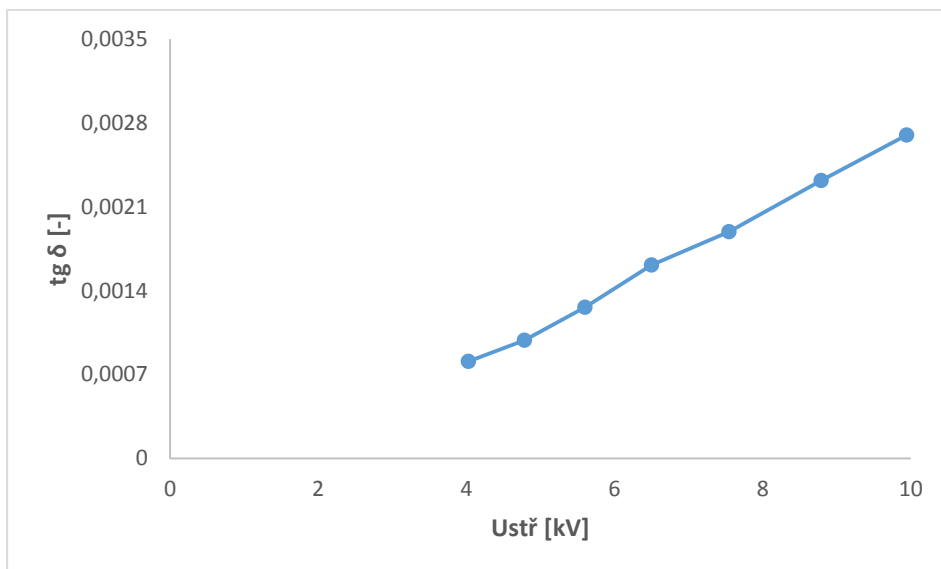
Pro naši měření bylo nastaveno počáteční napětí v hodnotě $U_{stř} = 4,03$ kV.

Zprvce postupně bylo zvyšované napětí na kondenzátoru A1 do pikové hodnoty napětí a bylo zjištěno jak dlouho vlastní izolace kondenzátoru během zkoušky vydrží **Tab. 9**.

$U_{stř}$ [kV]	$tg \delta$ 20°C	C_x [F]
4,03	0,0008	6,65E-09
4,79	0,0010	6,65E-09
5,60	0,0013	6,65E-09
6,50	0,0016	6,66E-09
7,55	0,0019	6,66E-09
8,79	0,0023	6,67E-09
9,95	0,0027	6,68E-09

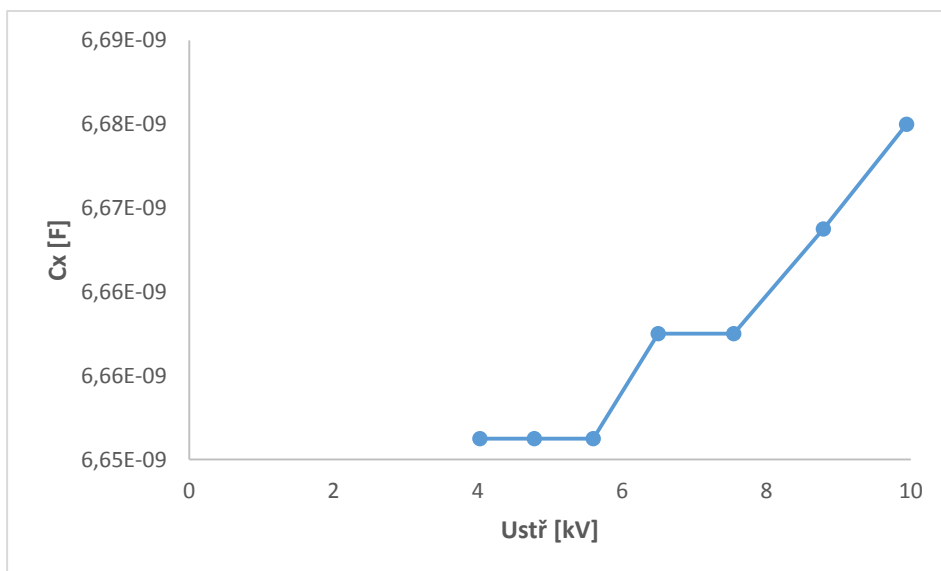
Tab. 9: Naměřené hodnoty $tg \delta$ a C_x na $U_{stř}$ u kondenzátoru A1

Graf závislosti ztrátového činitele $tg \delta$ na střídavém napětí $U_{stř}$ na **Obr. 6.14**. Podle obrázku je vidět, že s nárůstem $U_{stř}$ roste hodnota $tg \delta$ a tím i snížení izolačního odporu, co vede k postupnému stárnutí izolace kondenzátoru.



Obr. 6.14: Závislost $tg \delta$ na $U_{stř}$ u kondenzátoru A1

Izolace kondenzátoru A1 odešla při hodnotě $U_{stř}=10,1$ kV nebo $U_{ss} = 14,28$ kV, co je méně než jeho piková hodnota o 5 %, co je přibližně k jeho maximální pikové hodnotě $U_{ss}=15$ kV a závěrem je izolace kondenzátoru A1 během namáhání napětí nesplnila podmínku provozní pikové hodnoty napětí kondenzátoru A1 v $U_{stř} = 10,6 - 11$ kV. Graf závislosti kapacity C_x na střídavém napětí $U_{stř}$ na **Obr. 6.15**.



Obr. 6.15: Závislost C_x na $U_{stř}$ u kondenzátoru A1

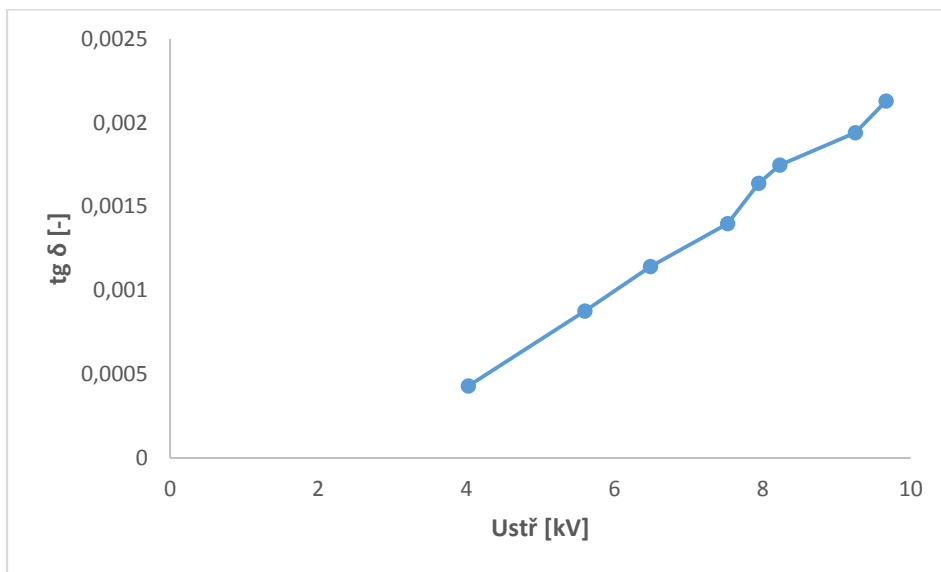
Kapacita C_x kondenzátoru A1 s nárůstem $U_{stř}$ klesá, je to vidět na **Obr. 6.15**. Tedy jde o hlavní vlastnost kondenzátoru (dielektrikum kondenzátoru svou polarizací

zmenšuje sílu elektrického pole nábojů na deskách a umožňuje tak umístění většího množství náboje) podle vztahu:

$$U = \frac{Q}{C} \quad (4)$$

S nárůstem napětí klesá jeho kapacita a tím i množství náboje, který může být na vodiči.

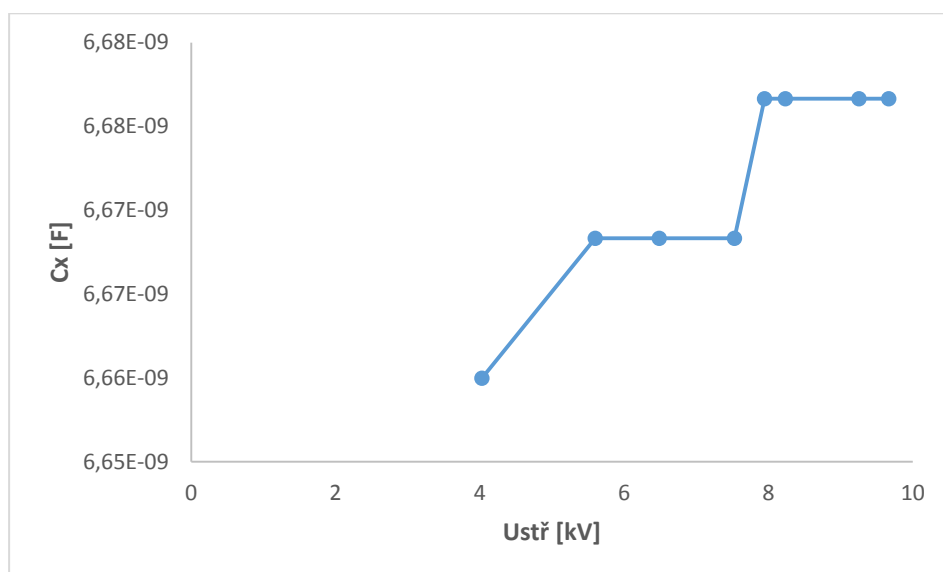
Stejným způsobem testování izolace bylo pokračováno měření kondenzátoru A2. Zkušební napětí $U_{stř}=4,03$ kV. Graf závislosti ztrátového činitele $tg \delta$ na střídavém napětí $U_{stř}$ na **Obr. 6.16**.



Obr. 6.16: Závislost $tg \delta$ na $U_{stř}$ u kondenzátoru A2

Izolace kondenzátor A2 se zničila při hodnotě $U_{stř} = 9,8$ kV nebo $U_{ss} = 13,86$ kV co méně o 8,2 % jeho pikové hodnoty. Dle parametrů kondenzátoru jeho izolace má vydržet hodnotu $U_{ss} = 15$ kV nebo $U_{stř} = 10,6 - 11$ kV. Z těchto dvou zkoušek izolace kondenzátoru je vidět, že dielektrikum nevydře napětové namáhání na jeho pikové hodnoty napětí. Vlastní zdroj napětový násobič pracuje v podmínkách stejnosměrného proudu a je možné příčinou proč izolace nevydře namáhání střídavého napětí je, že se dostává do kondenzátoru větší zátěž.

Graf závislosti kapacity C_x na střídavém napětí $U_{stř}$ na **Obr. 6.17**.



Obr. 6.17: Závislost C_x na $U_{stř}$ u kondenzátoru A2

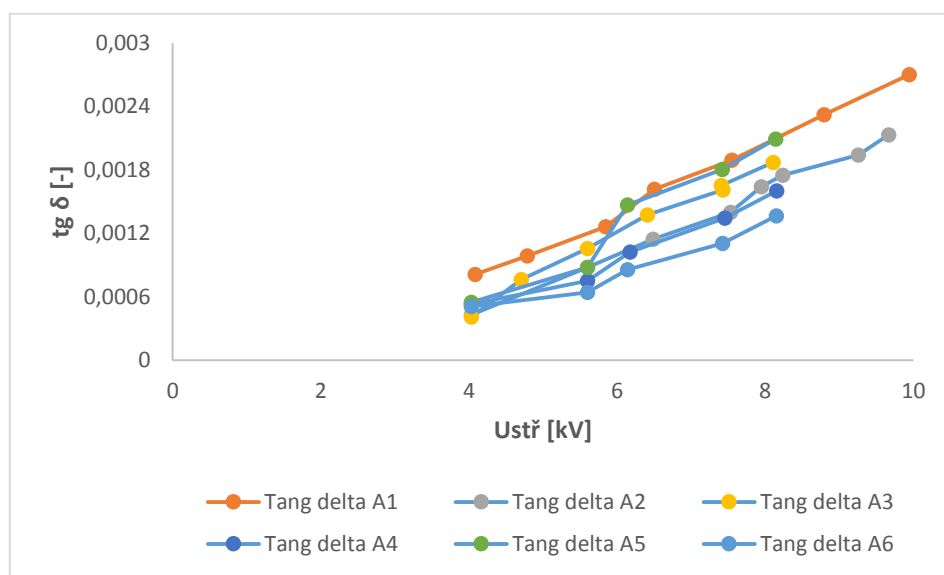
Kapacita C_x kondenzátoru A2 s nárůstem $U_{stř}$ klesá, je to vidět na **Obr. 6.17**. Kondenzátor A2 se chová téměř stejně jak kondenzátor A2, tedy jde o hlavní vlastnosti kondenzátoru to znamená, že s nárůstem napětí klesá jeho kapacita a tím i množství náboje, který může být na vodiči.

Naměřené hodnoty ztrátového činitele $tg \delta$ a kapacity C_x pro každý kondenzátor na desce A je vidět v **Tab. 10**.

Napěťový násobič deska_A			
	U [kv]	$tg \delta$ 20°C	C_x [F]
Kondenzátor_A1	4,03	0,0008	6,65E-09
	4,79	0,0010	6,65E-09
	5,60	0,0013	6,65E-09
	6,50	0,0016	6,66E-09
	7,55	0,0019	6,66E-09
	8,14	0,0023	6,67E-09
	9,95	0,0027	6,68E-09
Kondenzátor_A2	4,03	0,0004	6,66E-09
	4,49	0,0006	6,66E-09
	4,77	0,0006	6,66E-09
	5,60	0,0009	6,67E-09
	6,49	0,0011	6,67E-09
	7,53	0,0014	6,67E-09
	7,95	0,0016	6,68E-09
	8,13	0,0017	6,68E-09
	9,26	0,0019	6,68E-09
	9,67	0,0021	6,68E-09
Kondenzátor_A3	4,03	0,0004	6,69E-09
	4,71	0,0008	6,69E-09
	5,60	0,0011	6,70E-09
	6,41	0,0014	6,70E-09
	7,43	0,0016	6,70E-09
	7,41	0,0017	6,71E-09
	8,12	0,0019	6,71E-09
Kondenzátor_A4	4,03	0,0005	6,80E-09
	5,60	0,0007	6,80E-09
	6,18	0,0010	6,80E-09
	7,45	0,0013	6,81E-09
	8,14	0,0016	6,81E-09
Kondenzátor_A5	4,03	0,0005	6,69E-09
	4,71	0,0009	6,70E-09
	6,14	0,0015	6,70E-09
	7,42	0,0018	6,71E-09
	8,14	0,0021	6,71E-09
Kondenzátor_A6	4,03	0,0005	6,68E-09
	5,60	0,0006	6,68E-09
	6,14	0,0009	6,69E-09
	7,42	0,0011	6,69E-09
	8,11	0,0014	6,69E-09

Tab. 10: Naměřené hodnoty ztrátového činitele $tg \delta$ a kapacity C_x pro každý kondenzátor na desce A

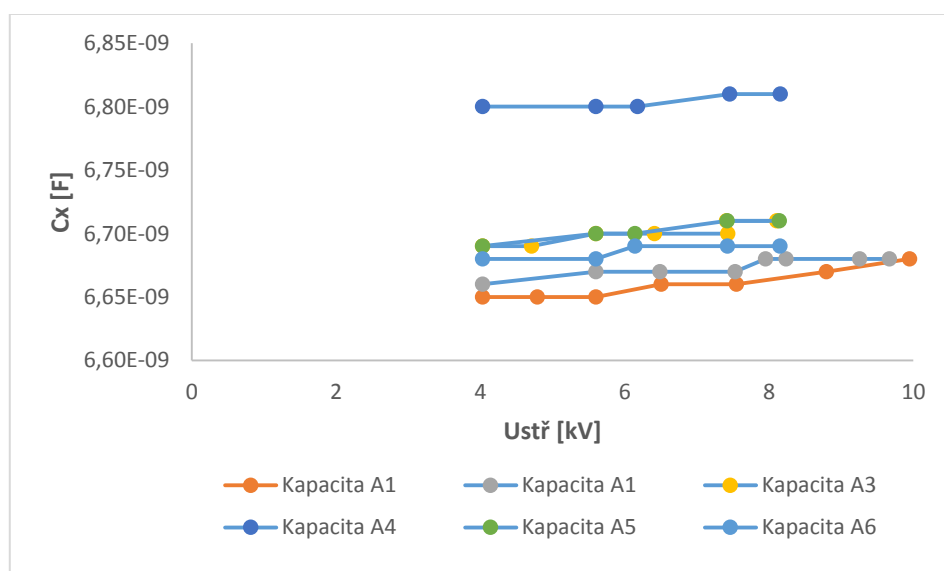
Takže je nakreslene a porovnané grafy závislosti ztrátového činitele $tg \delta$ a kapacity C_x na střídavém napětí $U_{stř}$ na **Obr. 6.18** a na **Obr. 6.19**.



Obr. 6.18: Závislost $tg \delta$ na $U_{stř}$ u kondenzátorů A1 – A6

Hodnota ztrátového činitele $tg \delta$ u každého kondenzátoru je odlišná. Je to způsobeno především kvalitou izolaci. Během zkoušek hodnota ztrátového činitele $tg \delta$ pouze narůstala co umožní zaznamenávat, že dielektrikum kondenzátoru snižoval svůj izolační odpor a došlo ke zhoršení a postupnému stárnutí izolace. Ideální je když během narostu střídavého napětí $U_{stř}$ hodnota ztrátového činitele $tg \delta$ se nemění.

Graf závislosti kapacity C_x na střídavém napětí $U_{stř}$ na **Obr. 6.19**.



Obr. 6.19: Závislost C_x na $U_{stř}$ u kondenzátorů A1 – A6

Každý z těchto kondenzátorů má odlišnou kapacitu C_x a ztrátový činitel $tg \delta$. Podle datasheetu vlastní piková kapacita C_x samotného kondenzátoru je 6,5 pF během

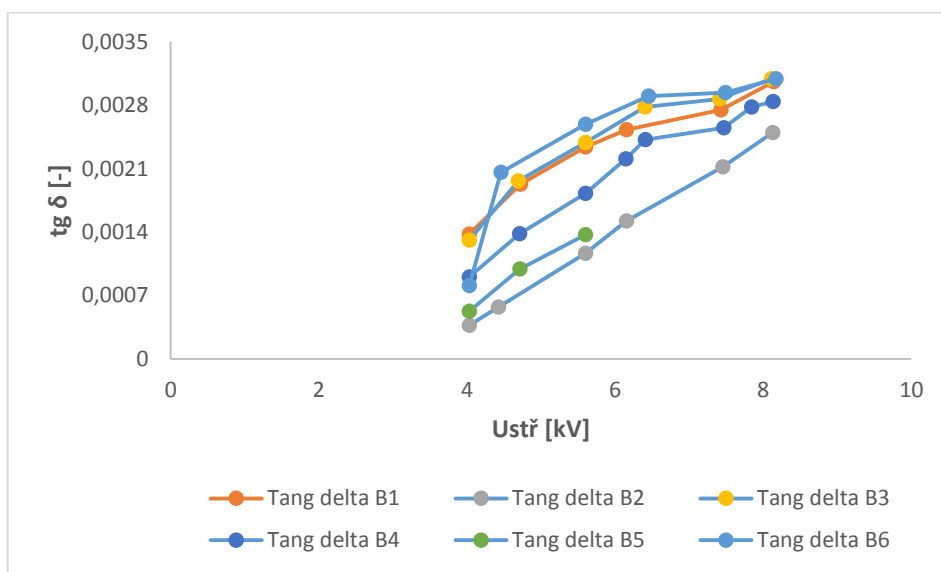
normálních podmínkách může se měnit v rozmezí -5+10 %, závěrem naší zkoušky hodnota kapacity C_x je větší o 5 – 7 %.

Naměřené hodnoty ztrátového činitele $tg \delta$ a kapacity C_x pro každý kondenzátor na desce B je vidět v **Tab. 11**.

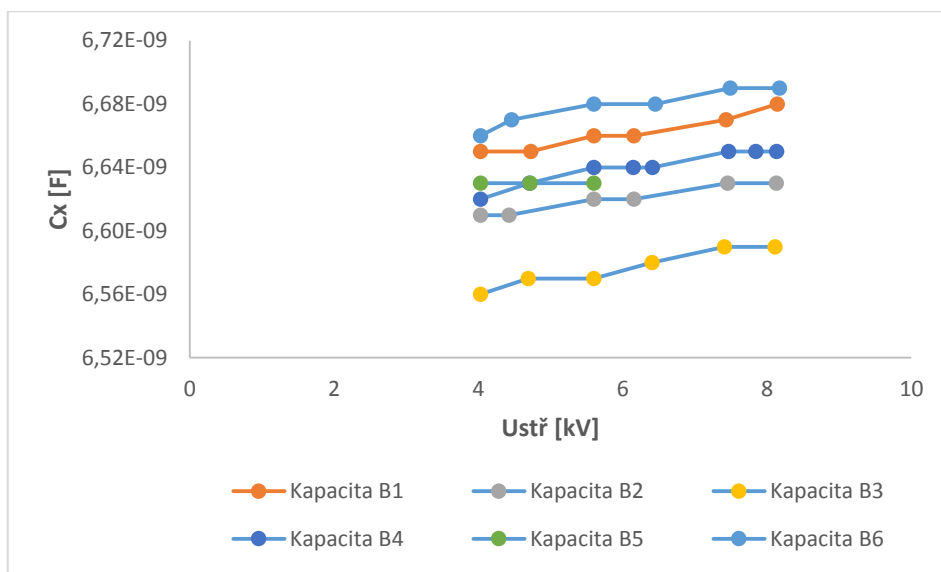
Napětový násobič deska_2			
	U [kv]	$tg \delta$ 20°C	C_x [F]
Kondenzátor_B1	4,03	0,0014	6,64E-09
	4,72	0,0019	6,65E-09
	5,60	0,0023	6,65E-09
	6,15	0,0025	6,66E-09
	7,43	0,0028	6,66E-09
	8,14	0,0031	6,67E-09
Kondenzátor_B2	4,03	0,0004	6,61E-09
	5,60	0,0006	6,61E-09
	5,75	0,0012	6,61E-09
	6,15	0,0015	6,62E-09
	7,45	0,0021	6,62E-09
	8,13	0,0025	6,63E-09
Kondenzátor_B3	4,03	0,0013	6,55E-09
	4,69	0,0020	6,56E-09
	5,60	0,0024	6,57E-09
	6,40	0,0028	6,57E-09
	7,41	0,0029	6,58E-09
	8,11	0,0031	6,59E-09
Kondenzátor_B4	4,03	0,0009	6,62E-09
	4,71	0,0014	6,62E-09
	5,60	0,0018	6,63E-09
	6,14	0,0022	6,64E-09
	6,41	0,0024	6,64E-09
	7,47	0,0026	6,64E-09
	7,84	0,0028	6,65E-09
	8,13	0,0028	6,65E-09
Kondenzátor_B5	4,03	0,0005	6,62E-09
	4,71	0,0010	6,63E-09
	5,60	0,0014	6,63E-09
Kondenzátor_B6	4,03	0,0008	6,65E-09
	4,46	0,0021	6,66E-09
	5,60	0,0026	6,67E-09
	6,45	0,0029	6,68E-09
	7,49	0,0029	6,68E-09
	8,12	0,0031	6,69E-09

Tab. 11: Naměřené hodnoty ztrátového činitele $tg \delta$ a kapacity C_x pro každý kondenzátor na desce B

Grafy závislosti ztrátového činitele $tg \delta$ a kapacity C_x na střídavém napětí $U_{stř}$ u kondenzátorů, které byly součástí desky B na Obr. 6.20 a na Obr. 6.21.



Obr. 6.20: Závislost $tg \delta$ na $U_{stř}$ u kondenzátorů B1 – B6



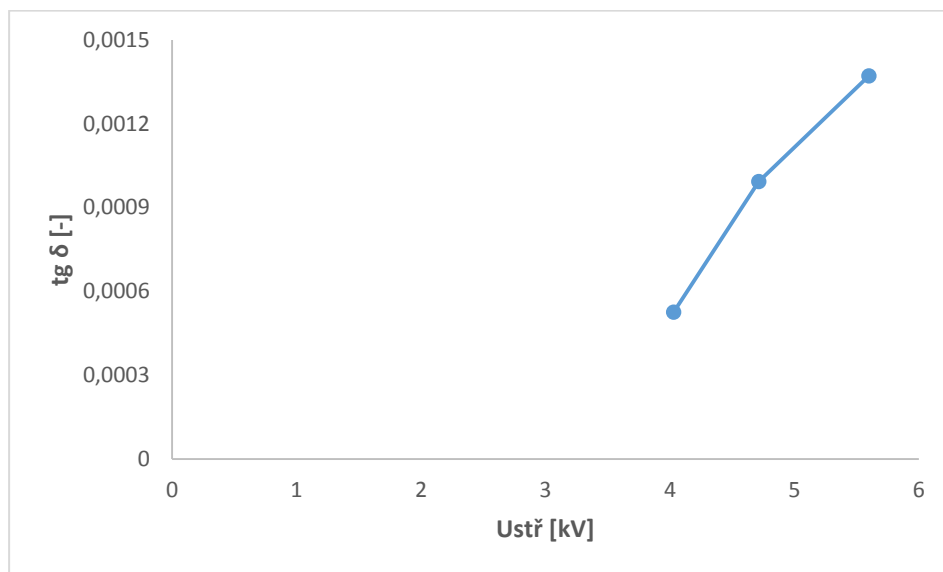
Obr. 6.21: Závislost C_x na $U_{stř}$ u kondenzátorů B1 – B6

Bylo zaměřeno na výsledku, jak se chová izolace kondenzátoru B5. Podařilo se provést měření pouze na tři hodnoty střídavého napětí $U_{stř}$ v Tab. 12.

$U_{stř}$ [kV]	$tg \delta$ 20°C	C_x [F]
4,03	0,0005	6,63E-09
4,71	0,0010	6,63E-09
5,60	0,0014	6,63E-09

Tab. 12: Naměřené hodnoty $tg \delta$ a C_x na $U_{stř}$ u kondenzátoru B5

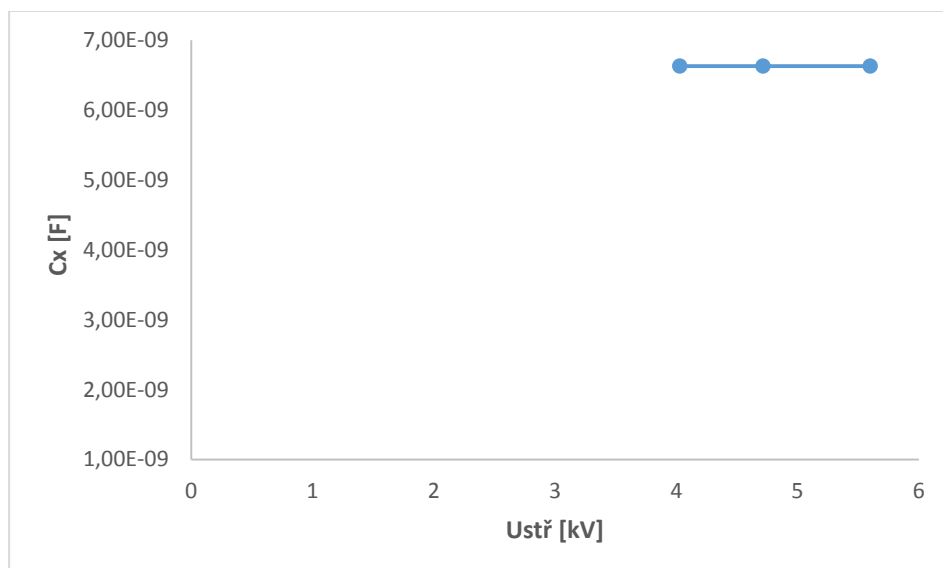
Je nakreslen graf závislosti ztrátového činitele $\operatorname{tg} \delta$ během třech nastvených hodnot střídavého napětí $U_{stř}$ na **Obr. 6.22**.



Obr. 6.22: Závislost $\operatorname{tg} \delta$ na $U_{stř}$ u kondenzátoru B5

Při hodnotě napětí $U_{stř}=8,3 \text{ kV}$ nebo $U_{ss} = 11,74 \text{ kV}$ izolace kondenzátoru odešla, nedochází k pikové hodnotě o 28 %, ale podle datasheetu je ideální v rozmezí 5 – 10 %. Hodnota ztrátového činitele $\operatorname{tg} \delta$ kondenzátoru B5 roste a tím se můžeme říct, že izolační schopnosti postupně zhoršili od začátku testování k jeho konci o 180 %.

Nasledujícím grafem je vidět závislost kapacity C_x samotného kondenzátoru B5 na střídavém napětí $U_{stř}$ na **Obr. 6.23**.



Obr. 6.23: Závislost C_x na $U_{stř}$ u kondenzátoru B5

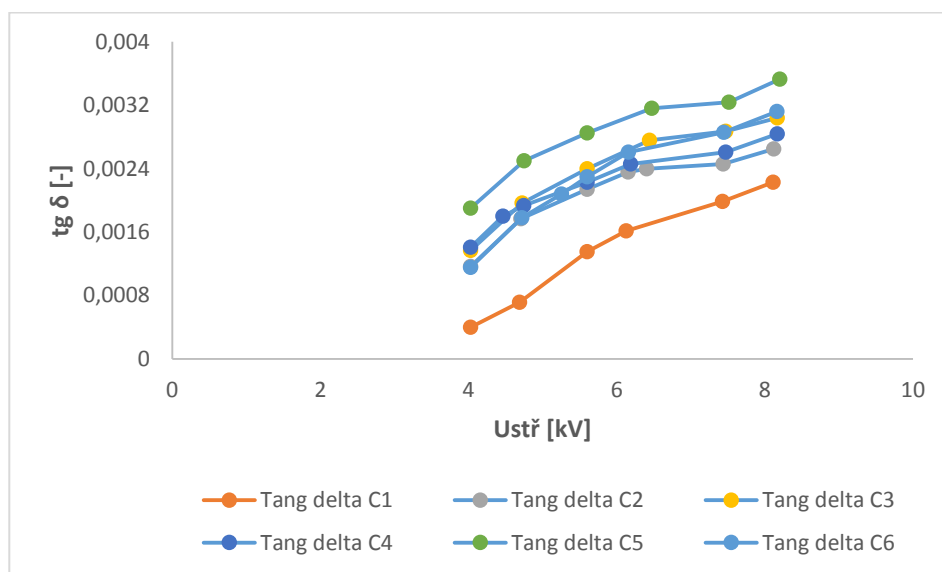
Z grafu na **Obr. 6.23** je vidět, že kapacita C_x u měřeného kondenzátoru B5 nemění, to znamená, že na deskách kondenzátoru s nárůstem napětí $U_{stř}$ množství náboje je stejné a nedochází k vybití elektrických nábojů.

Naměřené hodnoty ztrátového činitele $tg \delta$ a kapacity C_x pro každý kondenzátor na desce C je vidět v **Tab. 13**.

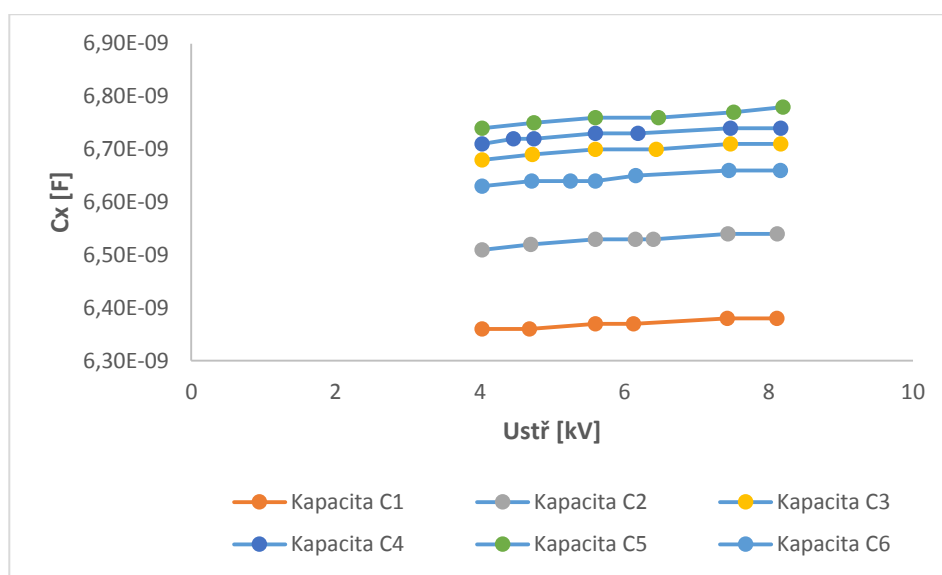
Napětový násobič deska_C			
	U [kv]	$tg \delta$ 20°C	C_x [F]
Kondenzátor_C1	4,03	0,0004	6,36E-09
	4,69	0,0007	6,36E-09
	5,60	0,0014	6,37E-09
	6,13	0,0016	6,37E-09
	7,43	0,0020	6,38E-09
	8,12	0,0022	6,38E-09
Kondenzátor_C2	4,03	0,0012	6,51E-09
	4,71	0,0018	6,52E-09
	5,60	0,0021	6,53E-09
	6,16	0,0024	6,53E-09
	6,40	0,0024	6,53E-09
	7,44	0,0025	6,54E-09
	8,12	0,0027	6,54E-09
Kondenzátor_C3	4,03	0,0014	6,68E-09
	4,73	0,0020	6,69E-09
	5,60	0,0024	6,70E-09
	6,45	0,0028	6,70E-09
	7,48	0,0029	6,71E-09
	8,13	0,0030	6,71E-09
Kondenzátor_C4	4,03	0,0014	6,71E-09
	4,47	0,0018	6,72E-09
	4,75	0,0019	6,72E-09
	5,60	0,0022	6,73E-09
	6,19	0,0025	6,73E-09
	7,47	0,0026	6,74E-09
	8,14	0,0028	6,74E-09
Kondenzátor_C5	4,03	0,0019	6,74E-09
	4,75	0,0025	6,75E-09
	5,60	0,0029	6,76E-09
	6,47	0,0032	6,76E-09
	7,52	0,0032	6,77E-09
	8,14	0,0035	6,78E-09
Kondenzátor_C6	4,03	0,0012	6,63E-09
	4,72	0,0018	6,64E-09
	5,25	0,0021	6,64E-09
	5,60	0,0023	6,64E-09
	6,16	0,0026	6,65E-09
	7,45	0,0029	6,66E-09
	8,13	0,0031	6,66E-09

Tab. 13: Naměřené hodnoty ztrátového činitele $tg \delta$ a kapacity C_x pro každý kondenzátor na desce C

Grafy závislosti ztrátového činitele $tg \delta$ a kapacity C_x na střídavém napětí $U_{stř}$ u kondenzátorů, které byly součástí desky C na Obr. 6.24 a na Obr. 6.25.



Obr. 6.24: Závislost $tg \delta$ na $U_{stř}$ u kondenzátorů C1 – C6



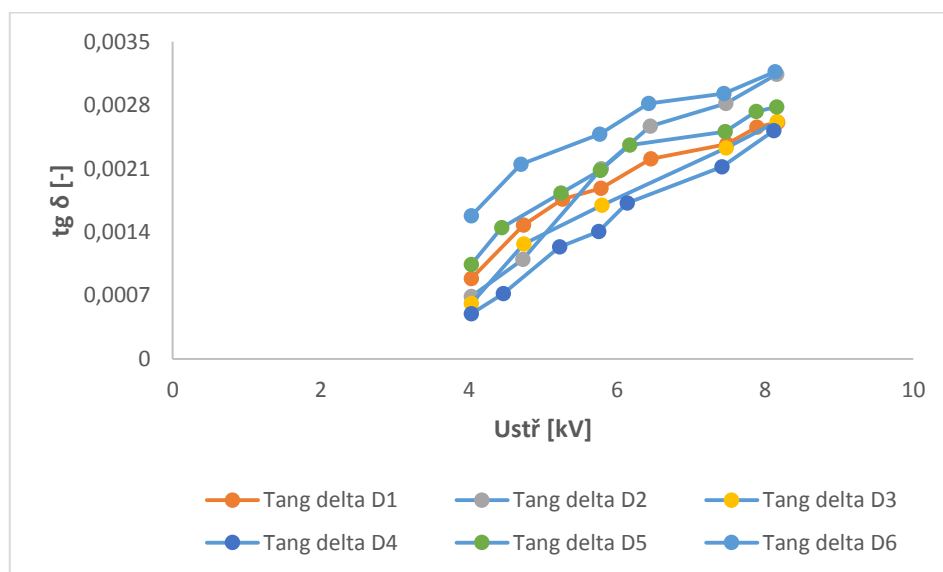
Obr. 6.25: Závislost C_x na $U_{stř}$ u kondenzátorů C1 – C6

Naměřené hodnoty ztrátového činitele $tg \delta$ a kapacity C_x pro každý kondenzátor na desce D je vidět v **Tab. 14**.

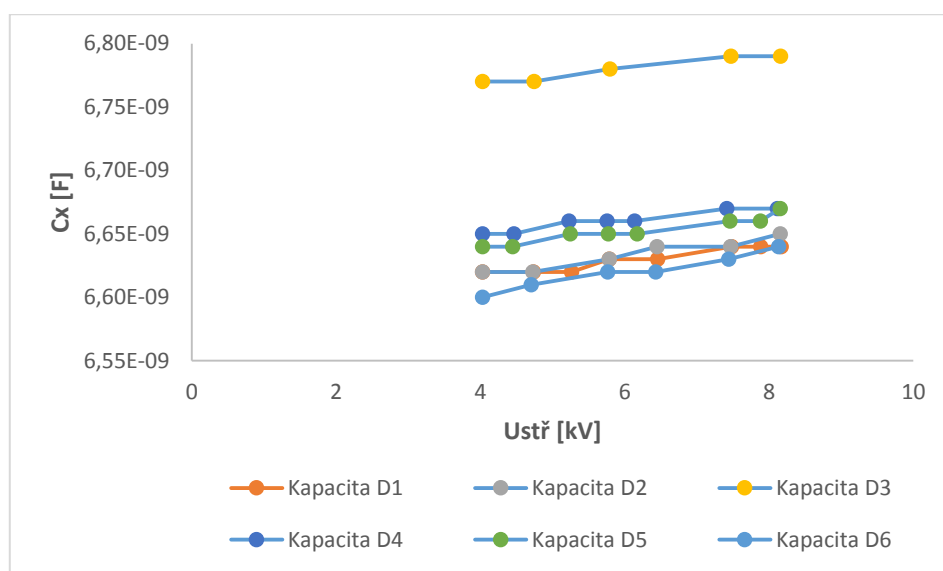
Napětový násobič deska_D			
	U [kV]	$tg \delta$ 20°C	C_x [F]
Kondenzátor_D1	4,03	0,0009	6,62E-09
	4,73	0,0015	6,62E-09
	5,26	0,0018	6,62E-09
	5,78	0,0019	6,63E-09
	6,46	0,0022	6,63E-09
	7,48	0,0024	6,64E-09
	7,88	0,0026	6,64E-09
	8,14	0,0026	6,64E-09
Kondenzátor_D2	4,03	0,0007	6,62E-09
	4,73	0,0011	6,62E-09
	5,79	0,0021	6,63E-09
	6,45	0,0026	6,64E-09
	7,47	0,0028	6,64E-09
	8,13	0,0031	6,65E-09
Kondenzátor_D3	4,03	0,0006	6,77E-09
	4,74	0,0013	6,77E-09
	5,79	0,0017	6,78E-09
	7,47	0,0023	6,79E-09
	8,14	0,0026	6,79E-09
Kondenzátor_D4	4,03	0,0005	6,65E-09
	4,46	0,0007	6,65E-09
	5,23	0,0012	6,66E-09
	5,75	0,0014	6,66E-09
	6,14	0,0017	6,66E-09
	7,41	0,0021	6,67E-09
	8,12	0,0025	6,67E-09
Kondenzátor_D5	4,03	0,0010	6,64E-09
	4,44	0,0014	6,64E-09
	5,24	0,0018	6,65E-09
	5,77	0,0021	6,65E-09
	6,17	0,0024	6,65E-09
	7,46	0,0025	6,66E-09
	7,88	0,0027	6,66E-09
	8,11	0,0028	6,67E-09
Kondenzátor_D6	4,03	0,0016	6,60E-09
	4,70	0,0022	6,61E-09
	5,76	0,0025	6,62E-09
	6,43	0,0028	6,62E-09
	7,44	0,0029	6,63E-09
	8,13	0,0032	6,64E-09

Tab. 14: Naměřené hodnoty ztrátového činitele $tg \delta$ a kapacity C_x pro každý kondenzátor na desce D

Grafy závislosti ztrátového činitele $tg \delta$ a kapacity C_x na střídavém napětí $U_{stř}$ u kondenzátorů, které byly součástí desky D na **Obr. 6.26** a na **Obr. 6.27**.



Obr. 6.26: Závislost $tg \delta$ na $U_{stř}$ u kondenzátorů D1 – D6



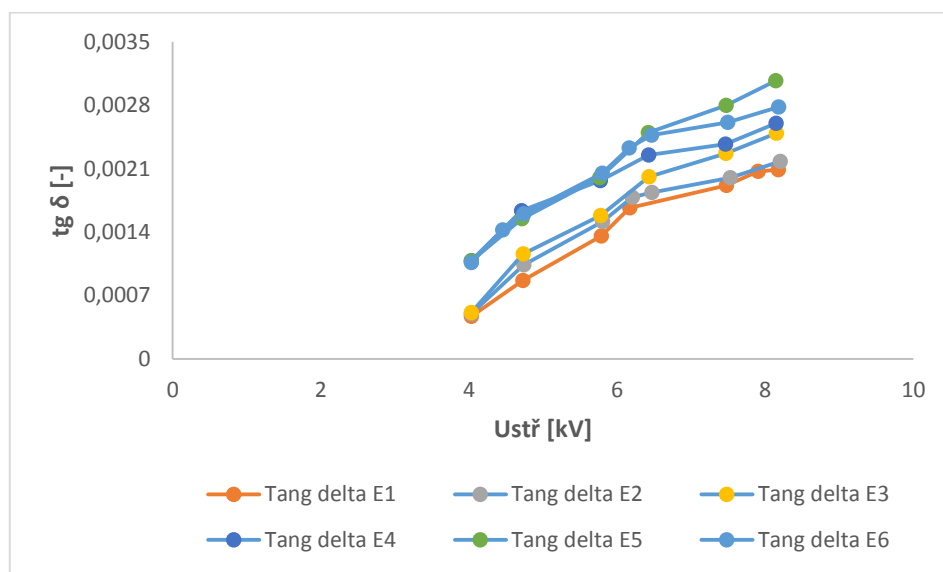
Obr. 6.27: Závislost C_x na $U_{stř}$ u kondenzátorů D1 – D6

Naměřené hodnoty ztrátového činitele $tg \delta$ a kapacity C_x pro každý kondenzátor na desce E je vidět v **Tab. 15**.

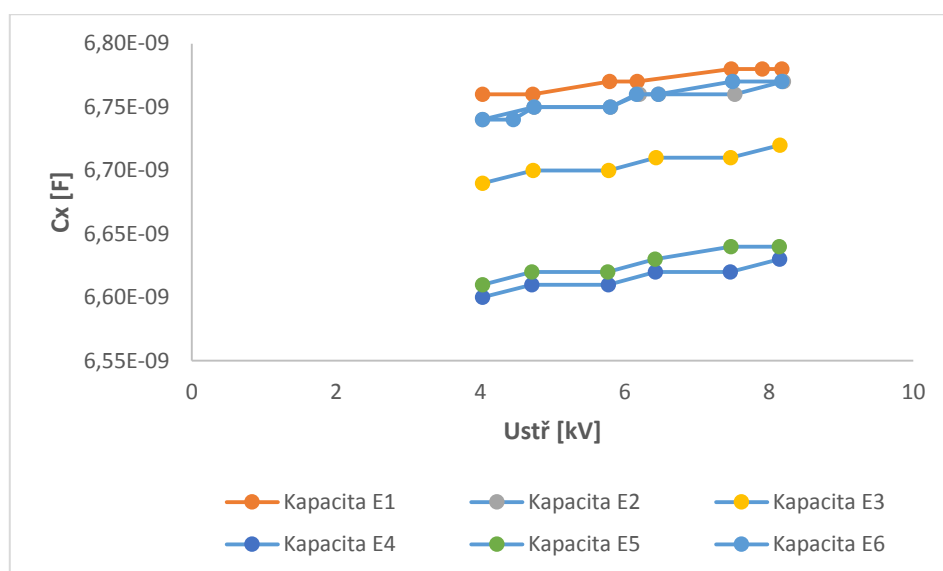
Napěťový násobič deska_E			
	U [kV]	$tg \delta$ 20°C	C_x [F]
Kondenzátor_E1	4,03	0,0005	6,76E-09
	4,73	0,0009	6,76E-09
	5,79	0,0014	6,77E-09
	6,17	0,0017	6,77E-09
	7,48	0,0019	6,78E-09
	7,90	0,0021	6,78E-09
	8,12	0,0021	6,78E-09
Kondenzátor_E2	4,03	0,0005	6,74E-09
	4,74	0,0010	6,75E-09
	5,80	0,0015	6,75E-09
	6,20	0,0018	6,76E-09
	6,47	0,0018	6,76E-09
	7,53	0,0020	6,76E-09
	8,14	0,0022	6,77E-09
Kondenzátor_E3	4,03	0,0005	6,69E-09
	4,73	0,0012	6,70E-09
	5,78	0,0016	6,70E-09
	6,43	0,0020	6,71E-09
	7,47	0,0023	6,71E-09
	8,15	0,0025	6,72E-09
Kondenzátor_E4	4,03	0,0011	6,60E-09
	4,71	0,0016	6,61E-09
	5,77	0,0020	6,61E-09
	6,43	0,0023	6,62E-09
	7,46	0,0024	6,62E-09
	8,13	0,0026	6,63E-09
Kondenzátor_E5	4,03	0,0011	6,61E-09
	4,71	0,0015	6,62E-09
	5,76	0,0020	6,62E-09
	6,42	0,0025	6,63E-09
	7,47	0,0028	6,64E-09
	8,11	0,0031	6,64E-09
Kondenzátor_E6	4,03	0,0011	6,74E-09
	4,45	0,0014	6,74E-09
	4,74	0,0016	6,75E-09
	5,80	0,0021	6,75E-09
	6,16	0,0023	6,76E-09
	6,47	0,0025	6,76E-09
	7,49	0,0026	6,77E-09
	8,12	0,0028	6,77E-09

Tab. 15: Naměřené hodnoty ztrátového činitele $tg \delta$ a kapacity C_x pro každý kondenzátor na desce E

Grafy závislosti ztrátového činitele $tg \delta$ a kapacity C_x na střídavém napětí $U_{stř}$ u kondenzátorů, které byly součástí desky E na **Obr. 6.28** a na **Obr. 6.29**.



Obr. 6.28: Závislost $tg \delta$ na $U_{stř}$ u kondenzátorů E1 – E6



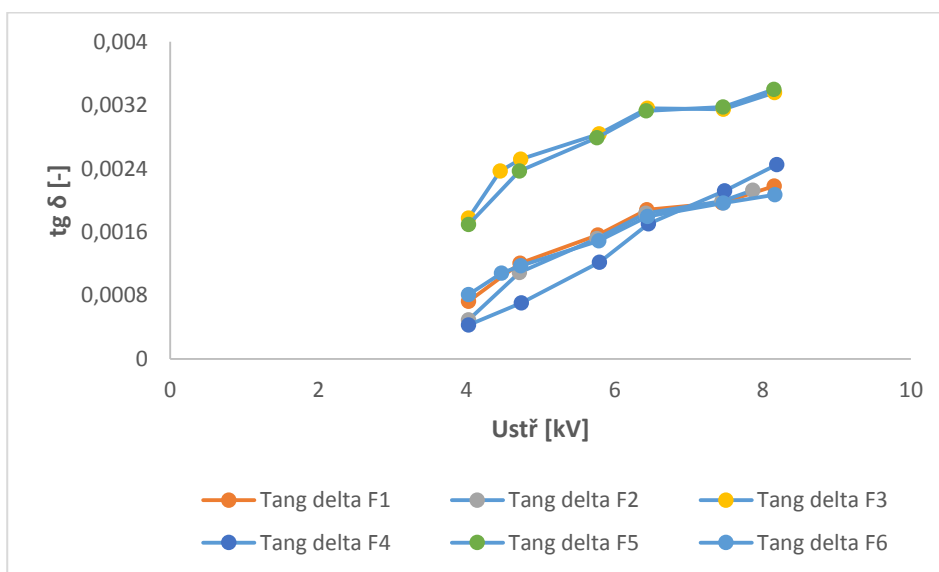
Obr. 6.29: Závislost C_x na $U_{stř}$ u kondenzátorů E1 – E6

Naměřené hodnoty ztrátového činitele $tg \delta$ a kapacity C_x pro každý kondenzátor na desce F je vidět v **Tab. 16**.

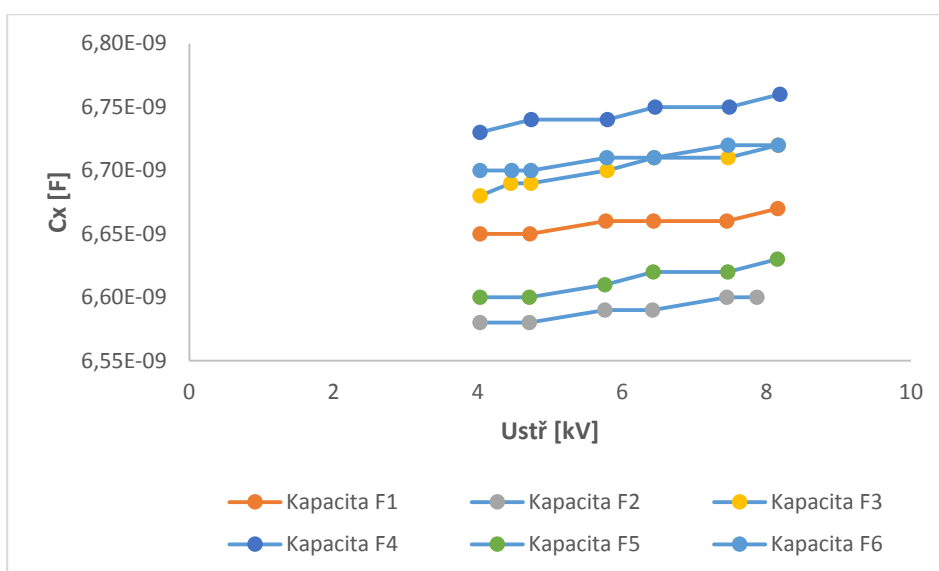
Napěťový násobič deska_F			
	U [kV]	$tg \delta$ 20°C	C_x [F]
Kondenzátor_F1	4,03	0,0007	6,65E-09
	4,72	0,0012	6,65E-09
	5,77	0,0016	6,66E-09
	6,44	0,0019	6,66E-09
	7,45	0,0020	6,66E-09
	8,14	0,0022	6,67E-09
Kondenzátor_F2	4,03	0,0005	6,58E-09
	4,72	0,0011	6,58E-09
	5,76	0,0015	6,59E-09
	6,42	0,0018	6,59E-09
	7,45	0,0020	6,60E-09
	8,12	0,0021	6,60E-09
Kondenzátor_F3	4,03	0,0018	6,68E-09
	4,45	0,0024	6,69E-09
	4,73	0,0025	6,69E-09
	5,79	0,0028	6,70E-09
	6,44	0,0032	6,71E-09
	7,47	0,0032	6,71E-09
	8,14	0,0034	6,72E-09
Kondenzátor_F4	4,03	0,0004	6,73E-09
	4,74	0,0007	6,74E-09
	5,79	0,0012	6,74E-09
	6,46	0,0017	6,75E-09
	7,48	0,0021	6,75E-09
	8,11	0,0025	6,76E-09
Kondenzátor_F5	4,03	0,0017	6,60E-09
	4,71	0,0024	6,60E-09
	5,76	0,0028	6,61E-09
	6,43	0,0031	6,62E-09
	7,46	0,0032	6,62E-09
	8,13	0,0034	6,63E-09
Kondenzátor_F6	4,03	0,0008	6,70E-09
	4,47	0,0011	6,70E-09
	4,73	0,0012	6,70E-09
	5,79	0,0015	6,71E-09
	6,45	0,0018	6,71E-09
	7,47	0,0020	6,72E-09
	8,12	0,0021	6,72E-09

Tab. 16: Naměřené hodnoty ztrátového činitele $tg \delta$ a kapacity C_x pro každý kondenzátor na desce F

Grafy závislosti ztrátového činitele $tg \delta$ a kapacity C_x na střídavém napětí $U_{stř}$ u kondenzátorů, které byly součástí desky F na Obr. 6.30 a na Obr. 6.31.



Obr. 6.30: Závislost $tg \delta$ na $U_{stř}$ kondenzátorů F1 – F6

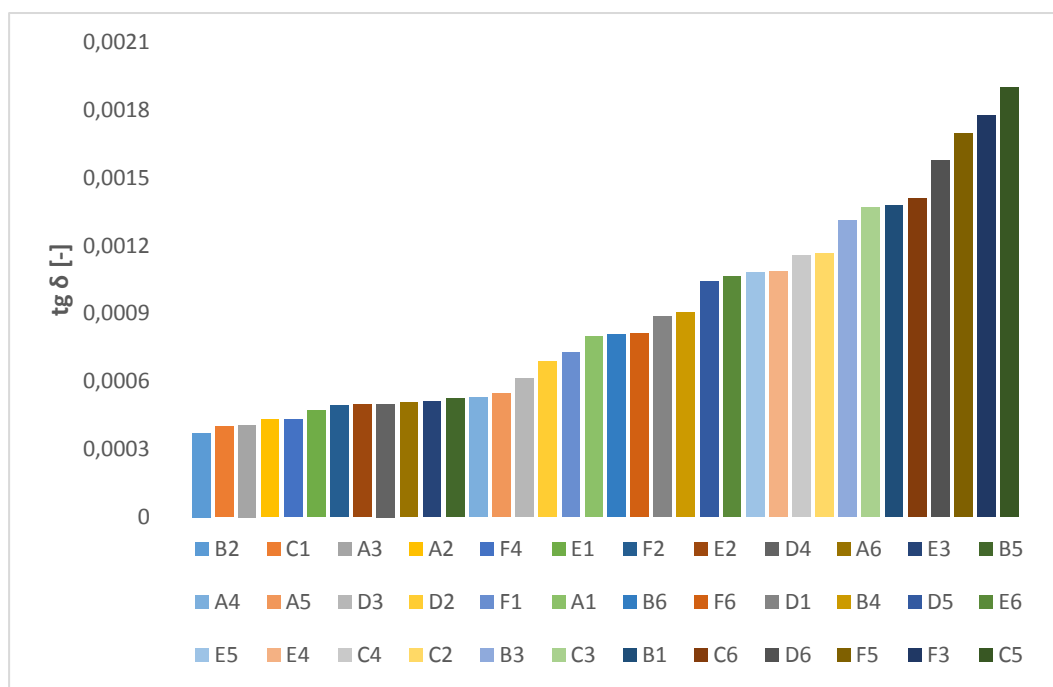


Obr. 6.31: Závislost C_x na $U_{stř}$ u kondenzátorů F1 – F6

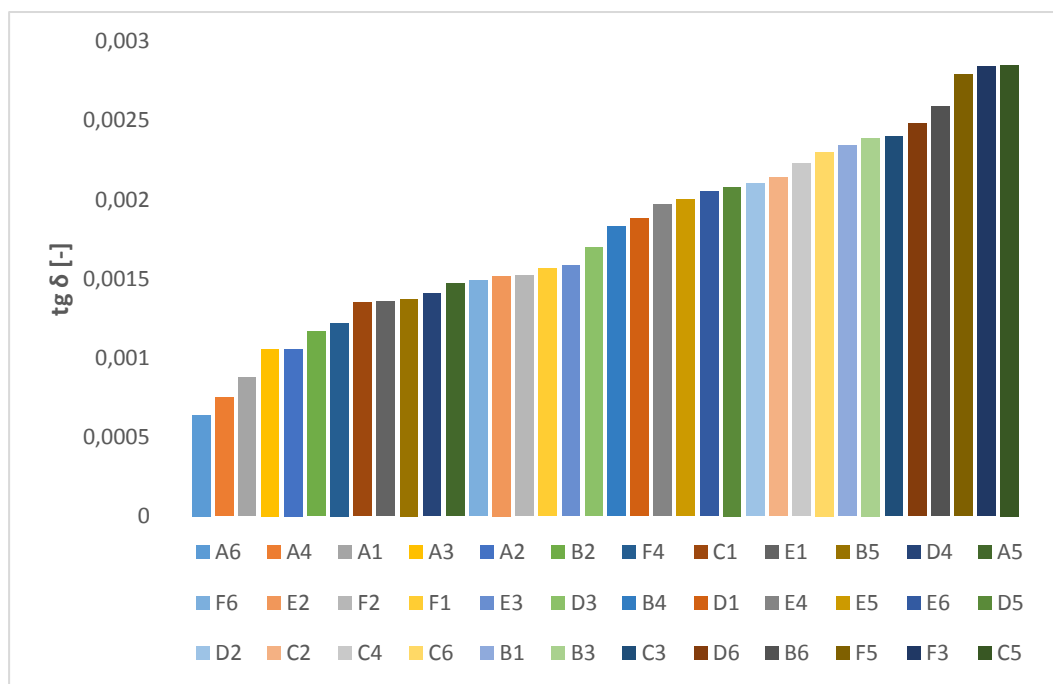
Z naměřených hodnot je vidět, že většina těch kondenzátorů má jak odlišnou kapacitu C_x cca o 5 – 10 % vyšší než dle datasheetu kondenzátorů, tak i jsou odlišné hodnoty ztrátového činitele $tg \delta$. Kapacita C_x kondenzátorů s nárůstem střídavého napětí $U_{stř}$ klesá a stejně klesá i množství náboje, který může být na vodiči. Co se týče ztrátového činitele $tg \delta$, je vidět, že s nárůstem střídavého napětí $U_{stř}$ roste hodnota ztrátového činitele $tg \delta$ a tím i snížení izolačního odporu, co vede k postupnému stárnutí izolace kondenzátorů. Ideální je když během nárůstu napětí $U_{stř}$ hodnota ztrátového činitele $tg \delta$ se nemění a je to znamená, že izolace kondenzátorů je v dobrém funkčním stavu.

Závěr k laboratorní úloze

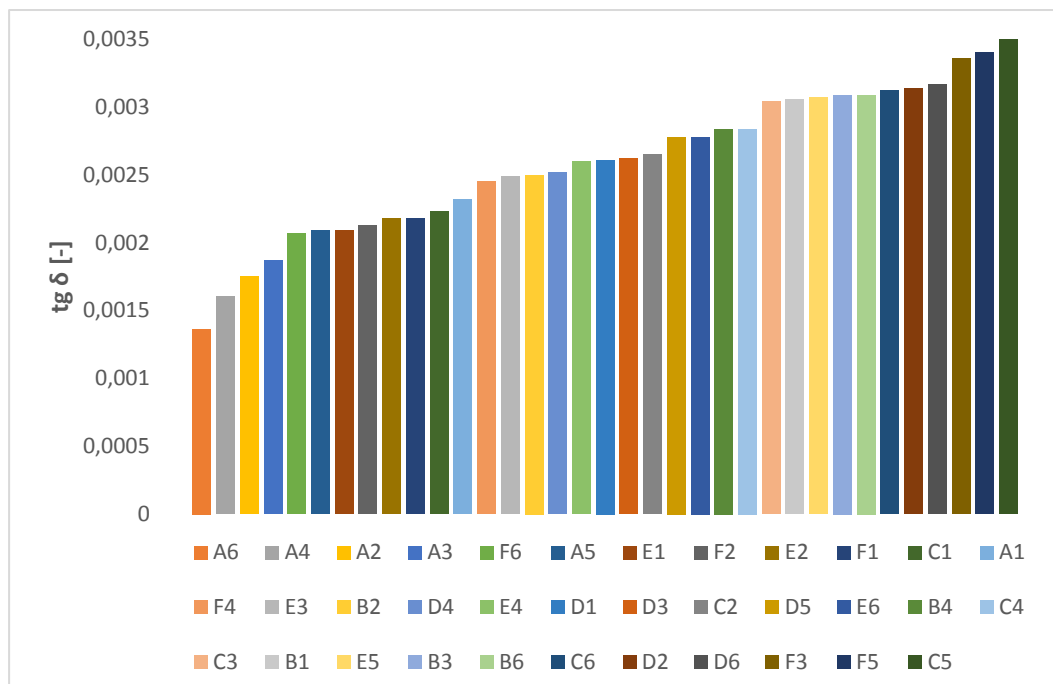
Statistické vyhodnocení změny ztrátových činitelů $tg \delta$ u vysokonapět'ových kondenzátorů při napětí $U_{stř}=4,03$ kV, 5,6 kV a 8,1 kV.



Obr. 6.32: Histogram změny ztrátových činitelů $tg \delta$ u naměřených kondenzátorů při $U_{stř}=4,03$ kV



Obr. 6.33: Histogram změny ztrátových činitelů $tg \delta$ u neměřených kondenzátorů při $U_{stř}=5,6$ kV



Obr. 6.34: Histogram změny ztrátových činitelů $tg \delta$ u naměřených kondenzátorů při $U_{stř}=8,1$ kV

Z těchto histogramů je vidět, že s nárůstem střídavého napětí $U_{stř}$ i roste hodnota ztrátového činitele $tg \delta$. Při $U_{stř}=4,03$ kV lepší izolační schopnosti mají kondenzátory **B2, C1, A3, A2, F4** a horší mají **C6, D6, F5, F3, C5**. Při $U_{stř}=5,6$ kV lepší schopnosti mají kondenzátory **A6, A4, A1, A3, A2** a horší mají **D6, B6, F5, F3, C5** a při $U_{stř}=8,1$ kV lepší izolační schopnosti mají kondenzátory **A6, A4, A2, A3, F6** a horší **D2, D6, F3, F5, C5**. Zvýšení ztrátového činitele $tg \delta$ vede k stárnutí izolace, je to znamená omezení izolačních schopností izolace, snížení izolačního odporu. U zestárnutých vysokonapět'ových kondenzátorů, na rozdíl od nových s izolací z polypropylenu, mají ztráty při zvyšování zkušebního napětí $U_{stř}$ větší tendenci růst a je to znázorněno na **Obr. 6.32 – 6.34**.

6.5. Měření částečných výbojů, proudových impulzů s injektážním kondenzátorem

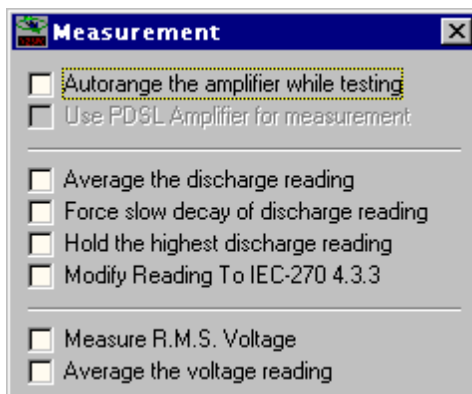
Postup měření částečných výbojů, proudových impulzů I_{PD} galvanickou metodou s injektážním kondenzátorem C_i bude probíhat v následujících krocích:

- zapojení obvodu pro měření proudových impulzů I_{PD} galvanickou metodou s injektážním kondenzátorem C_i podle **Obr. 6.7**;
- provedení jednotlivých kroků nastavení a přípravení (kalibrace, nastavení programu, nastavení analyzačního obvodu) měřicího systému;
- měření proudových impulzů I_{PD} v izolaci vysokonapět'ových kondenzátorů;
- nastavení a postupně zvyšování zkušebního střídavého napětí $U_{stř}$;
- spuštění analyzačního modulu;
- po ukončení analýzy a měření nastavení napětí na nulu a následně odpojení zdroje napětí;
- vyhodnocení naměřených hodnot a nakreslení grafů závislosti proudových impulzů I_{PD} na střídavém napětí $U_{stř}$;
- statistické vyhodnocení změny proudových impulzů I_{PD} v kondenzátorech při napětí $U_{stř}=4,03$ kV, 5,6 Kv, 8,1 kV.

Tuto úlohu jsme se chtěli vypracovat pomocí přístroje HIPOTRONICS DDX-8003 Pulse Discrimination System. Je komplikace v tom, že HIPOTRONICS DDX-8003 PDS je velmi citlivý a užitečný při nastavené hodnotě proudového impulsu I_{PD} pod 1 pC, co v našem případě nejde nastavit, protože máme velmi špatné vysokonapět'ové kondenzátory, s velkým výskytem počtů částečných výbojů. Dalším problémem je samotná kalibrace celého měřicího systému. Kalibrace měřicího systému musíme provádět každých cca 10 min, co pro nás je velmi dlouho, protože máme velký počet vysokonapět'ových kondenzátorů pro testování, a proto radši provádět měření pomocí přístroje HIPOTRONICS DDX-7003. Nastavení měření, kalibrace systému HIPOTRONICS DDX-7003 budou popsany dále.

Nastavení měření

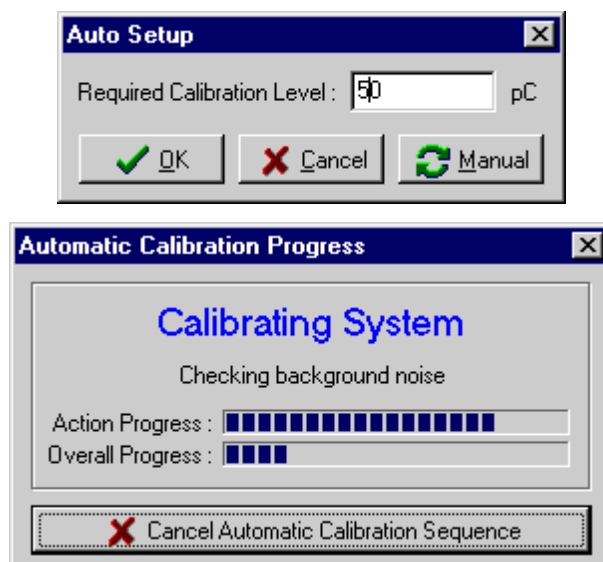
Spustit program DDX-7000 a nastavit měření, ale zaprvé zaškrtnout položky: *Autorange the amplifier while testing*, *Average the discharge reading*, *Force slow decay of discharge reading*, *Extreme Load Gain Correction*, *Measure R.M.S. Voltage*, *Average the voltage reading*.



Obr. 6.35: Nastavení měření

Kalibrace

Před zahájením měření je nutně provést kalibraci samotného systému. Provést kalibraci měřicího systému stisknutím tlačítka pro automatickou kalibraci. V okně pro kalibraci **Obr. 6.36** nastavit požadovanou hodnotu v režimu kalibrátoru, která bude produkovat kalibrační kondenzátor. Kalibrační hodnota by měla odpovídat měření částečným výbojům. Pro naši zkoušku je to hodnota 5 pC a stisknutím OK se spustí kalibrační proces.



Obr. 6.36: Kalibrace měřicího systému

Po provedení kalibrace je nutně zkontrolovat, jestli v sekci měření není zobrazena indikace na nezakalibrovaný systém **Obr. 6.37**.



Obr. 6.37: Sekce měření po kalibraci

Vypracování laboratorní úlohy a naměřených hodnot

Pro samotné měření částečných výbojů v kondenzátorech byly používány kondenzátory s předchozího testování ztrátového činitele $tg \delta$, například, kondenzátor A3, A4 apod. Izolace zbývajících kondenzátorů je ve funkčním stavu, a proto jsou využitelné pro další testování a měření částečných výbojů.

Z předchozího testování ztrátového činitele $tg \delta$ galvanickou metodou můstkovým zapojením bylo zjištěno, že izolace kondenzátorů A1, A2 a B5 odešla při následujících hodnotách $U_{stř}=10,1$ kV, 9,8 kV a 8,3 kV nebo $U_{ss}=14,28$ kV, 13,86 kV a 11,74 kV a to znamená, že jich nebudeme dále používat.

Naše měření bylo zahájeno nastavením hodnoty $U_{stř} = 4,03$ kV, je stejná hodnota jak během měření galvanickou metodou můstkovým zapojením a postupně hodnota $U_{stř}$ zvyšována do hodnot $U_{stř}=5,6$ kV a 8,1 kV.

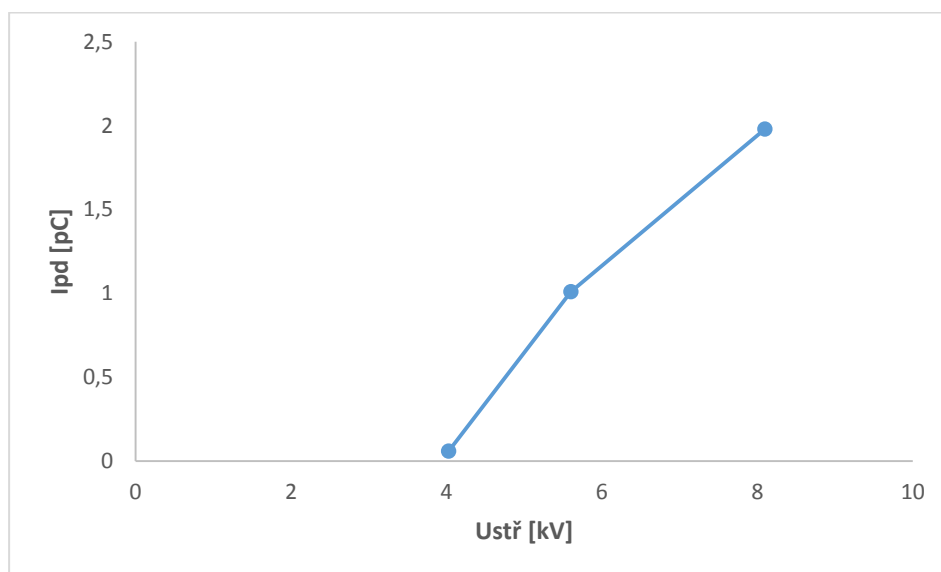
Pro první zkoušku byly použity kondenzátory A3 – A6 a naměřené hodnoty je vidět v následující **Tab. 17**.

Napětový násobič deska A		
	U [kV]	I_{PD} [pC]
Kondenzátor A3	4,03	0,06
	5,60	0,45
	8,10	0,51
Kondenzátor A4	4,03	0,06
	5,60	1,01
	8,10	1,98
Kondenzátor A5	4,03	0,33
	5,60	0,93
	8,10	0,55
Kondenzátor A6	4,03	0,05
	5,60	0,39
	8,10	0,54

Tab. 17: Naměřené hodnoty proudových impulzů I_{PD} pro každý kondenzátor na desce A

Podle naměřených hodnot proudových impulzů I_{PD} byly zajímavé výsledky u kondenzátorů A4 a A5.

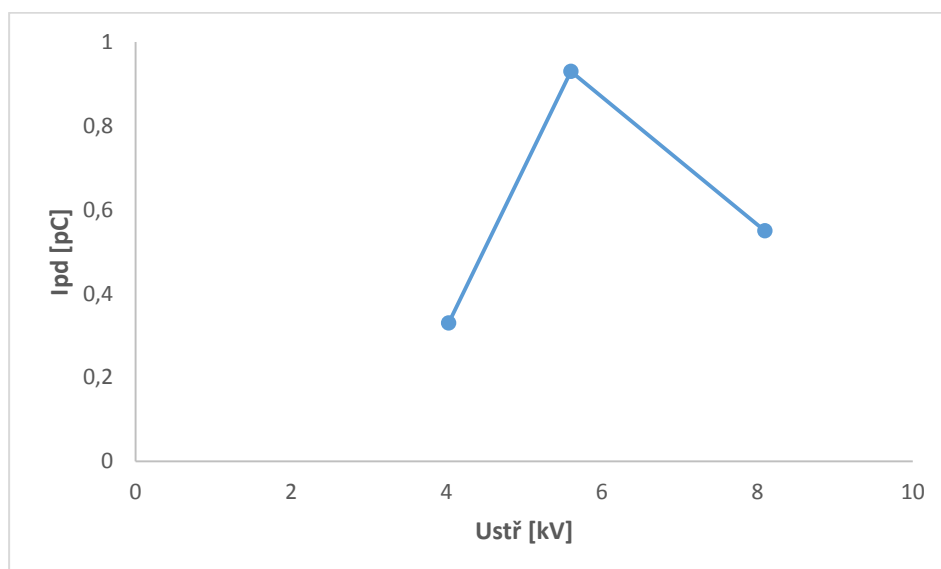
Graf závislosti proudového impulsu I_{PD} na střídavém napětí $U_{stř}$ u kondenzátoru A4 na **Obr. 6.38**.



Obr. 6.38: Závislost I_{PD} na $U_{stř}$ u kondenzátoru A4

Hodnota proudového impulsu I_{PD} u kondenzátoru A4 výrazně roste s hodnoty 0,06 pC do 1,98 pC a pomocí procentuálního vyjádření hodnota roste o 3133 %, to může být ovlivněno jak špatným uchopením kondenzátoru A4 mezi kulovými elektrodami a tím způsobují korónu, tak vnějším rušivým vlivem a impulzy.

Graf závislosti proudového impulsu I_{PD} na střídavém napětí $U_{stř}$ u kondenzátoru A5 na **Obr. 6.39**.

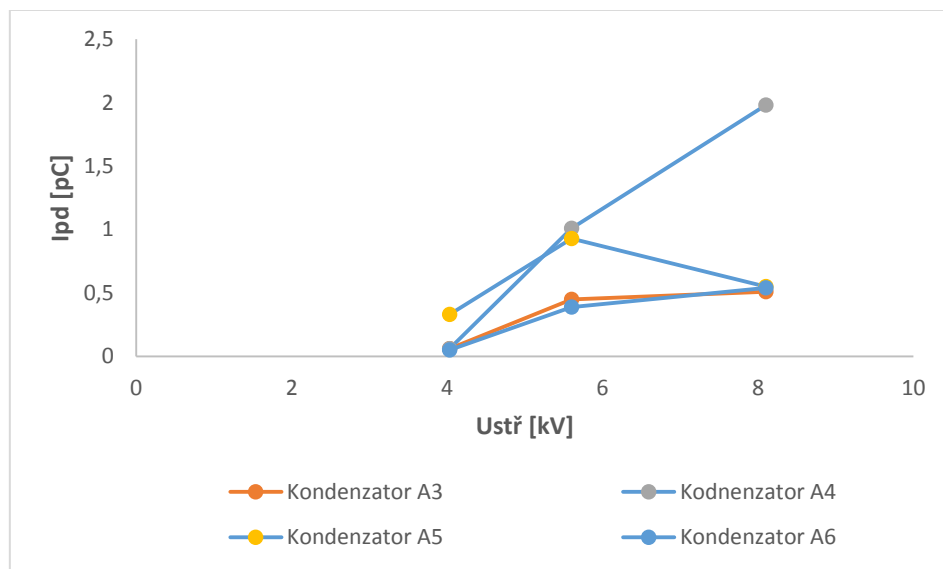


Obr. 6.39: Závislost I_{PD} na $U_{stř}$ u kondenzátoru A5

Hodnota proudového impulsu I_{PD} u kondenzátoru A5 s nárůstem střídavého napětí $U_{stř}$ do 5,6 kV roste a potom s vzrůstajícím střídavým napětím $U_{stř}$ klesá. To může být způsobeno

špatným zapojení kondenzátoru A5 mezi kulovými elektrody, kde se mohou vzniknout vnější částečné výboje na hrotech kondenzátoru.

Grafy závislosti proudového impulsu I_{PD} na střídavém napětí $U_{stř}$ u kondenzátoru A3 – A6, které byly součástí desky A na **Obr. 6.40**.



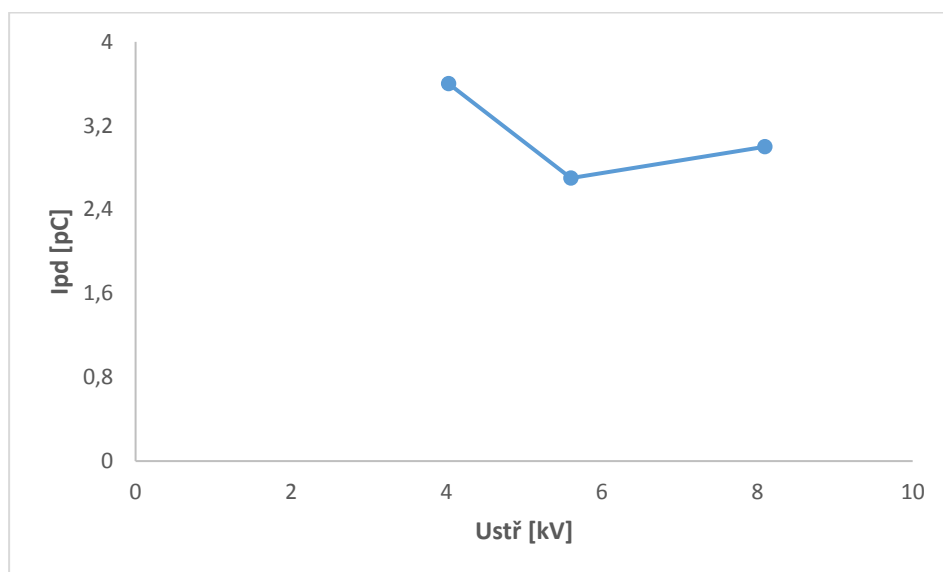
Obr. 6.40: Závislost I_{PD} na $U_{stř}$ u kondenzátorů A3 – A6

Naměřené hodnoty proudových impulsů I_{PD} u kondenzátorů B1 – B6 v **Tab. 18**.

Napětový násobič deska_B		
	$U[kV]$	$I_{PD}[pC]$
Kondenzátor B1	4,03	2,10
	5,60	3,70
	8,10	4,30
Kondenzátor B2	4,03	0,05
	5,60	0,32
	8,10	0,75
Kondenzátor B3	4,03	3,10
	5,60	3,70
	8,10	4,50
Kondenzátor B4	4,03	3,60
	5,60	2,70
	8,10	3,00
Kondenzátor B6	4,03	3,30
	5,60	3,50
	8,10	4,00

Tab. 18: Naměřené hodnoty proudových impulsů I_{PD} pro každý kondenzátor na desce B

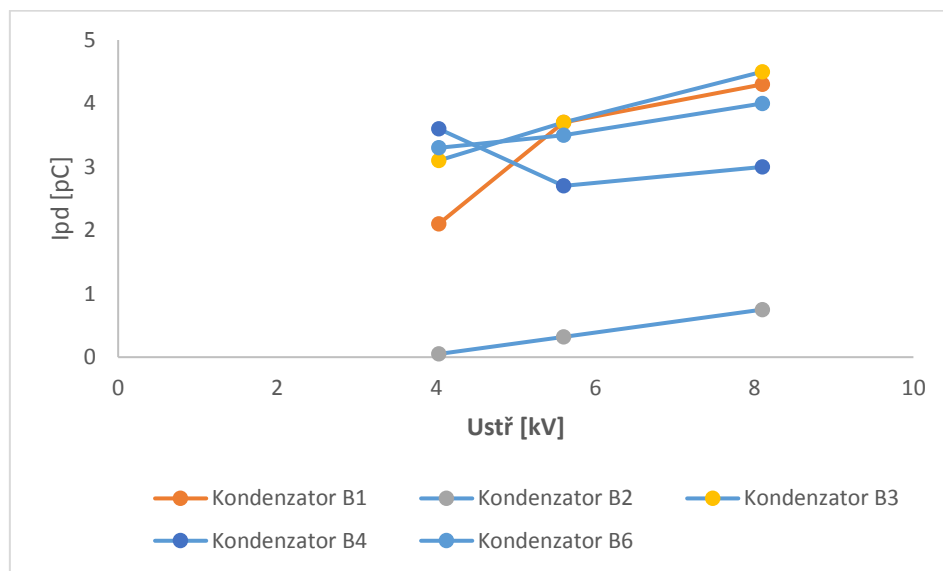
Podle naměřených hodnot byl vyzkoušen kondenzátor B4 a jeho graf závislosti proudového impulsu I_{PD} na střídavém napětí $U_{stř}$ je na **Obr. 6.41**.



Obr. 6.42: Závislost I_{PD} na $U_{stř}$ u kondenzátoru B4

Hodnota proudového impulsu I_{PD} u kondenzátoru B4 při hodnotě střídavého napětí $U_{stř}$ je 3,6 pC, po druhém nastavení do $U_{stř}=5,6$ kV je hodnota $I_{PD}=2,7$ pC a potom zase při hodnotě $U_{stř}=8,1$ kV roste i hodnota proudového impulsu $I_{PD}=3,0$ pC, to může být ovlivněno rychlým nabitím kondenzátoru B4 a na deskách kondenzátoru B4 je větší náboj.

Graf závislosti proudových impulsů I_{PD} na střídavém napětí $U_{stř}$ na **Obr. 6.43**.



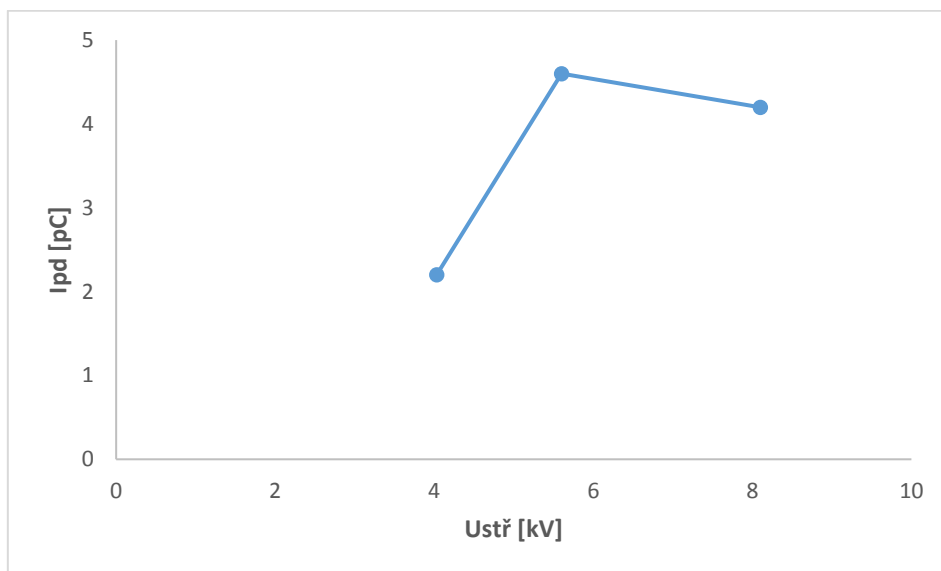
Obr. 6.43: Závislost I_{PD} na $U_{stř}$ u kondenzátorů B1 – B6

Naměřené hodnoty proudových impulzů I_{PD} u kondenzátorů C1 – C6 v **Tab. 19**.

Napěťový násobič deska C		
	U [kV]	I_{PD} [pC]
Kondenzátor C1	4,00	0,05
	5,60	0,70
	8,10	1,40
Kondenzátor C2	4,03	3,40
	5,60	3,90
	8,10	4,00
Kondenzátor C3	4,03	4,50
	5,60	4,50
	8,10	4,90
Kondenzátor C4	4,03	4,50
	5,60	4,90
	8,10	5,10
Kondenzátor C5	4,03	3,60
	5,60	4,60
	8,10	4,90
Kondenzátor C6	4,03	2,20
	5,60	4,60
	8,10	4,20

Tab. 19: Naměřené hodnoty proudových impulzů I_{PD} pro každý kondenzátor na desce C

Z naměřených hodnot proudových impulzů I_{PD} je vidět stejný děj jak u kondenzátoru A5 na **Obr. 6.44**.

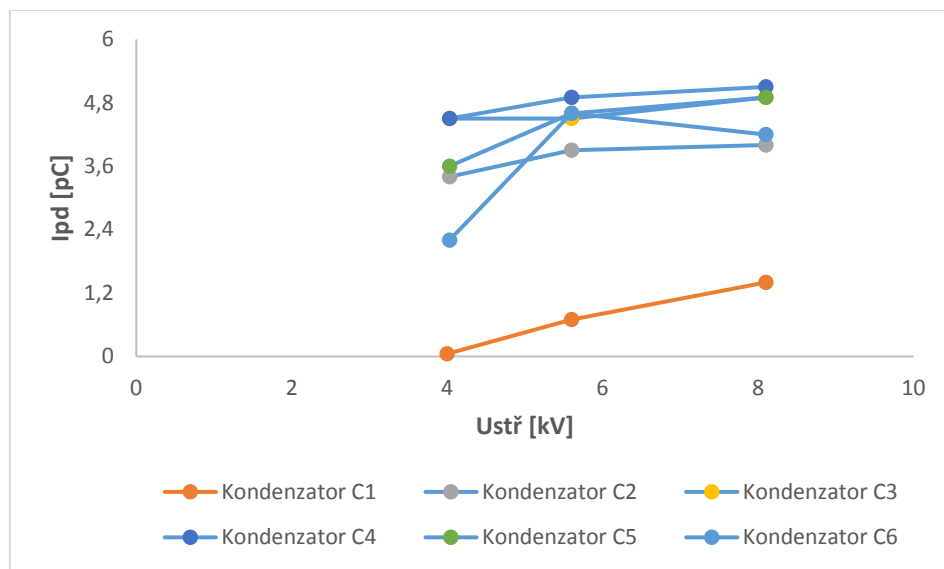


Obr. 6.44: Závislost I_{PD} na $U_{stř}$ u kondenzátoru C6

Hodnota proudového impulsu I_{PD} u kondenzátoru C6 s nárůstem střídavého napětí $U_{stř}$ do 5,6 kV roste a potom s vzrůstajícím střídavým napětím $U_{stř}$ klesá. To může být způsobeno

špatným zapojením kondenzátoru C6 mezi kulovými elektrodami, kde se mohou vzniknout vnější částečné výboje na hrotech kondenzátoru.

Graf závislosti proudových impulzů I_{PD} na střídavém napětí $U_{stř}$ u kondenzátorů C1 – C6 na Obr. 6.45.



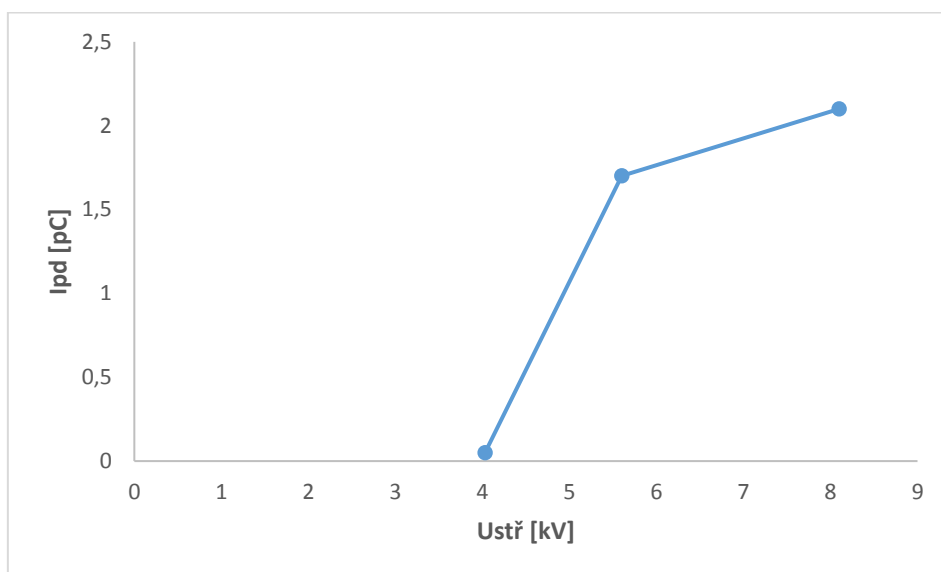
Obr. 6.45: Závislost I_{PD} na $U_{stř}$ u kondenzátorů C1 – C6

Naměřené hodnoty proudových impulzů I_{PD} u kondenzátorů D1 – D6 v Tab. 20.

Napětový násobič deska_D		
	$U[\text{kV}]$	$I_{PD} [\text{pC}]$
Kondenzátor D1	4,03	2,20
	5,60	4,20
	8,10	4,40
Kondenzátor D2	4,03	0,27
	5,60	0,39
	8,10	0,55
Kondenzátor D3	4,03	0,34
	5,60	1,30
	8,10	1,50
Kondenzátor D4	4,03	0,05
	5,60	1,70
	8,10	2,10
Kondenzátor D5	4,03	1,50
	5,60	3,20
	8,10	3,50
Kondenzátor D6	4,03	2,90
	5,60	4,20
	8,10	5,00

Tab. 20: Naměřené hodnoty proudových impulzů I_{PD} pro každý kondenzátor na desce D

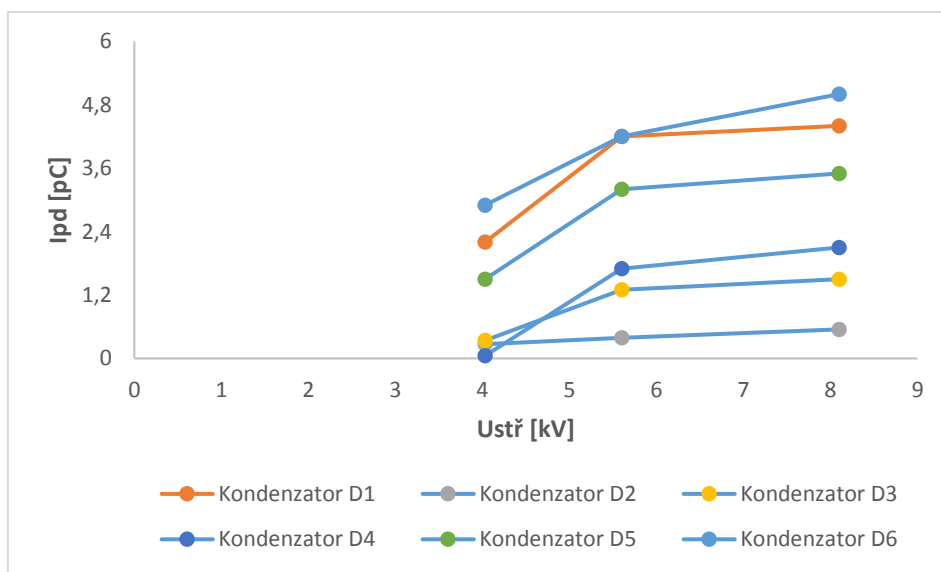
Z naměřených hodnot je vidět velmi odlišné chování izolace kondenzátoru D4. Na **Obr. 6.46** je závislost proudových impulzů I_{PD} na střídavém napětí $U_{stř}$.



Obr. 4.46: Závislost I_{PD} na $U_{stř}$ u kondenzátoru D4

Hodnota proudového impulsu I_{PD} u kondenzátoru D4 výrazně roste s hodnoty 0,05 pC do 2,10 pC a je ta hodnota roste o 4100 %, to může být ovlivněno jak špatným uchopením kondenzátoru A4 mezi kulovými elektrodami a tím způsobují korózi nebo vnější částečné výboje na hrotech kondenzátoru, tak vnitřním částečným výbojem v dielektriku kondenzátoru a vnější rušivé vlivy a impulzy, procházejícím v systému.

Graf závislosti proudových impulzů I_{PD} na střídavém napětí $U_{stř}$ u kondenzátorů D1 – D6 na **Obr. 6.47**.



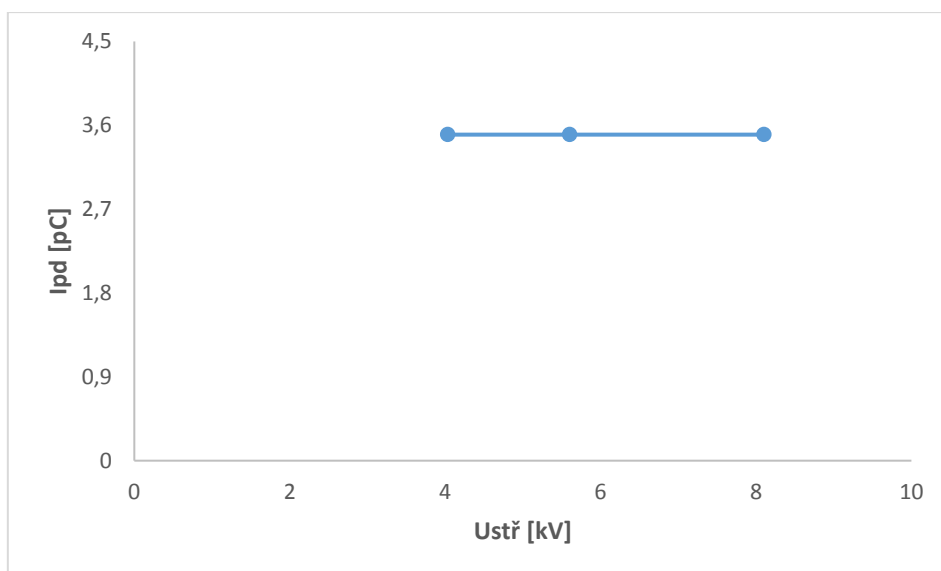
Obr. 6.47: Závislost I_{PD} na $U_{stř}$ u kondenzátorů D1 – D6

Naměřené hodnoty proudových impulzů I_{PD} u kondenzátorů E1 – E6 v **Tab. 21**.

Napětový násobič deska E		
	$U[\text{kV}]$	$I_{PD}[\text{pC}]$
Kondenzátor E1	4,03	0,17
	5,60	1,50
	8,10	1,20
Kondenzátor E2	4,03	0,24
	5,60	1,70
	8,10	1,60
Kondenzátor E3	4,03	0,24
	5,60	1,70
	8,10	1,70
Kondenzátor E4	4,03	1,50
	5,60	2,20
	8,10	3,20
Kondenzátor E5	4,03	3,50
	5,60	3,50
	8,10	3,50
Kondenzátor E6	4,03	1,70
	5,60	1,70
	8,10	2,00

Tab. 21: Naměřené hodnoty proudových impulzů I_{PD} pro každý kondenzátor na desce E

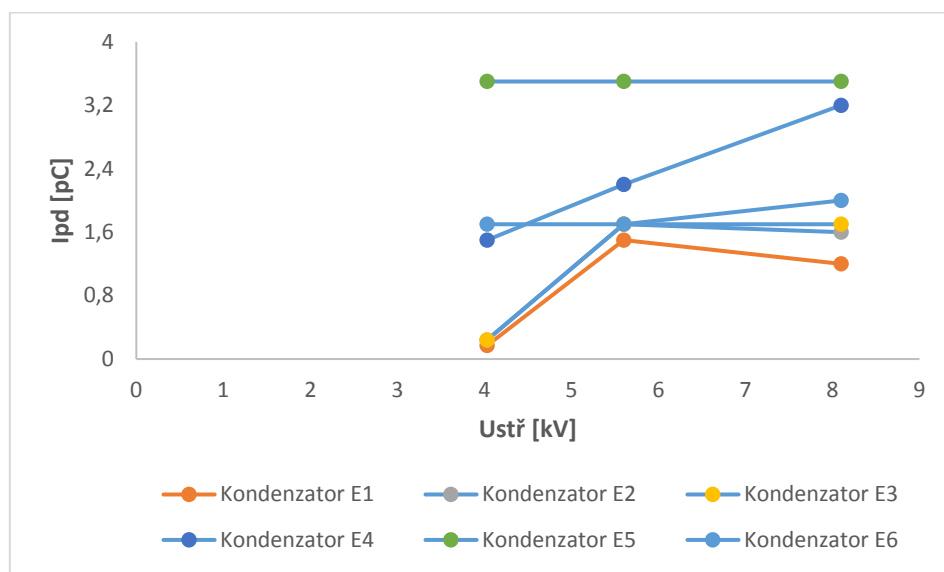
Během nastavení střídavého napětí $U_{stř}=4,03$ do 8,1 kV nedocházelo k žádným změnám proudových impulzů $I_{PD}=3,5$ pC u kondenzátoru E5. Graf závislosti proudových impulzů I_{PD} na střídavém napětí $U_{stř}$ u kondenzátoru E5 je na **Obr. 6.48**.



Obr. 6.48: Závislost I_{PD} na $U_{stř}$ u kondenzátoru E5

Je to způsobeno tím, že bylo špatné uchopení samotného kondenzátoru E5 mezi kulovými elektrodami během zkoušky a proto hodnota proudového impulsu se nezměnila.

Graf závislosti proudových impulzů I_{PD} na střídavém napětí $U_{stř}$ u kondenzátorů E1 – E6 na **Obr. 6.49**.



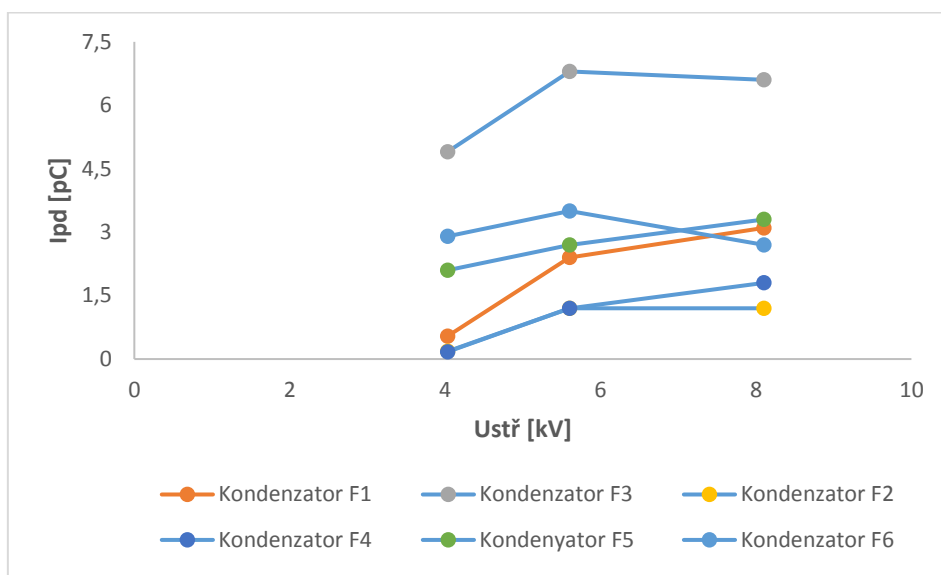
Obr. 6.49: Závislost I_{PD} na $U_{stř}$ u kondenzátorů E1 – E6

Naměřené hodnoty proudových impulzů I_{PD} u kondenzátorů F1 – F6 v **Tab. 22**.

Napěťový násobič deska F		
	U [kV]	I_{PD} [pC]
Kondenzátor F1	4,03	0,54
	5,60	2,40
	8,10	3,10
Kondenzátor F2	4,03	0,18
	5,60	1,20
	8,10	1,20
Kondenzátor F3	4,03	4,90
	5,60	6,80
	8,10	6,60
Kondenzátor F4	4,03	0,17
	5,60	1,20
	8,10	1,80
Kondenzátor F5	4,03	2,10
	5,60	2,70
	8,10	3,30
Kondenzátor F6	4,03	2,90
	5,60	3,50
	8,10	2,70

Tab. 22: Naměřené hodnoty proudových impulzů I_{PD} pro každý kondenzátor na desce F

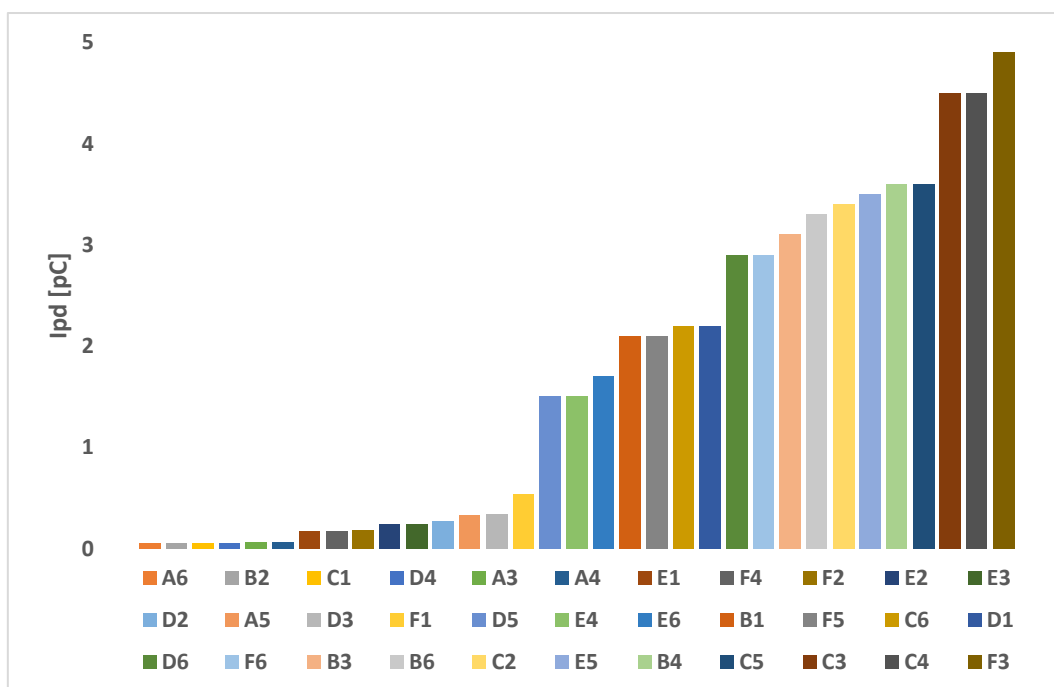
Graf závislosti porovnání proudových impulzů I_{PD} na střídavém napětí $U_{stř}$ u kondenzátorů E1 – E6 na **Obr. 6.50**.



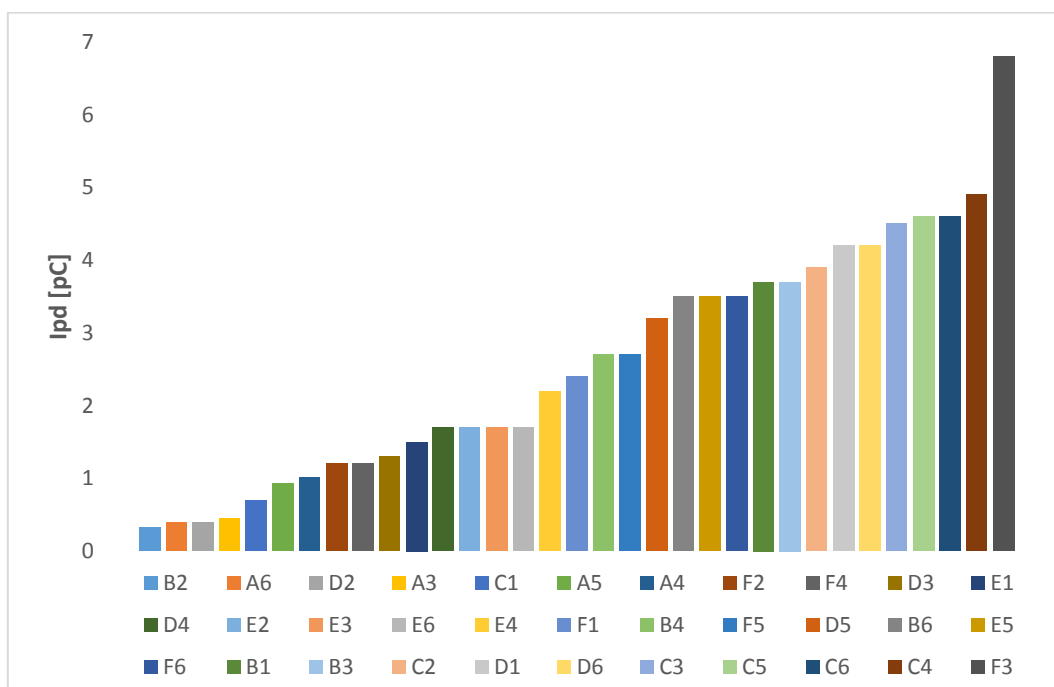
Obr. 6.50: Závislost I_{PD} na $U_{stř}$ u kondenzátorů F1 – F6

Závěr k laboratorní úloze

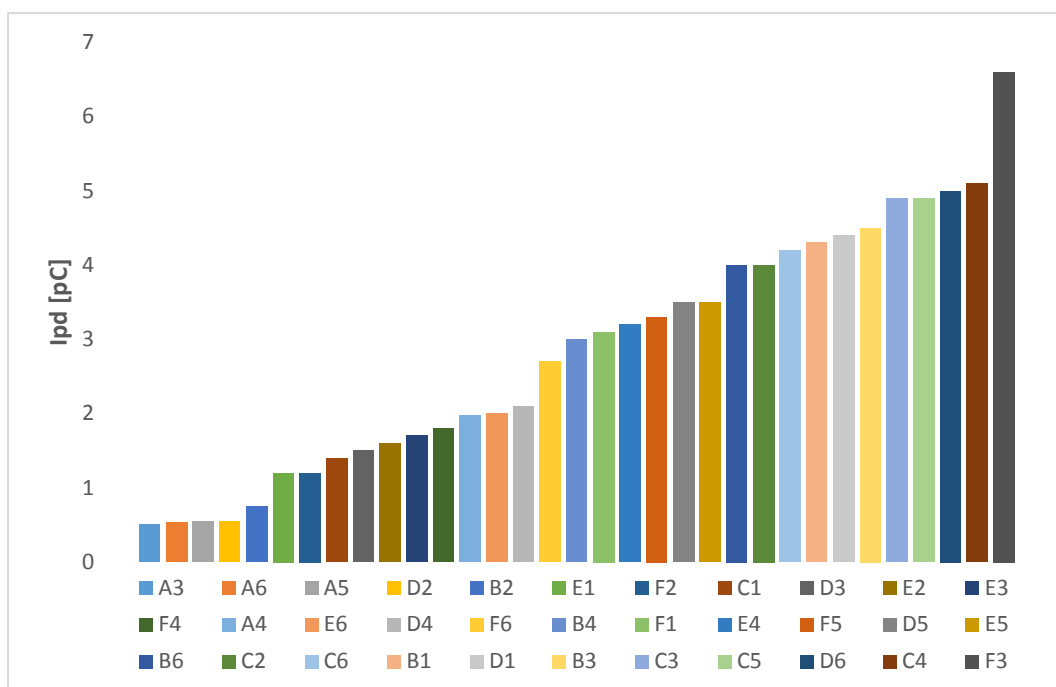
Statistické vyhodnocení změny proudových impulzů I_{PD} u vysokonapět'ových kondenzátorů při napětí $U_{stř}=4,03$ kV, 5,6 kV a 8,1 kV.



Obr. 6.51: Histogram změny proudových impulzů I_{PD} u naměřených kondenzátorů při $U_{stř}=4,03$ kV



Obr. 6.52: Histogram změny proudových impulzů I_{PD} u naměřených kondenzátorů při $U_{stř}=5,6$ kV



Obr. 6.53: Histogram změny proudových impulzů I_{PD} u naměřených kondenzátorů při $U_{stř}=8,1$ kV

Z těchto histogramů je vidět, že s nárůstem střídavého napětí $U_{stř}$ i roste hodnota proudového impulsu I_{PD} . Při $U_{stř}=4,03$ kV lepší hodnoty proudových impulzů I_{PD} mají kondenzátory **A6, B2, C1, D4, A3** a horší mají **B4, C5, C3, C4, F3**. Při $U_{stř}=5,6$ kV lepší hodnoty mají kondenzátory **B2, A6, D2, A3, C1** a horší mají **C3, C5, C6, C4, F3** a při $U_{stř}=8,1$ kV lepší hodnoty mají kondenzátory **A6, A4, A2, D2, B2** a horší mají kondenzátory **C3, C5, D6, C4, F3**.

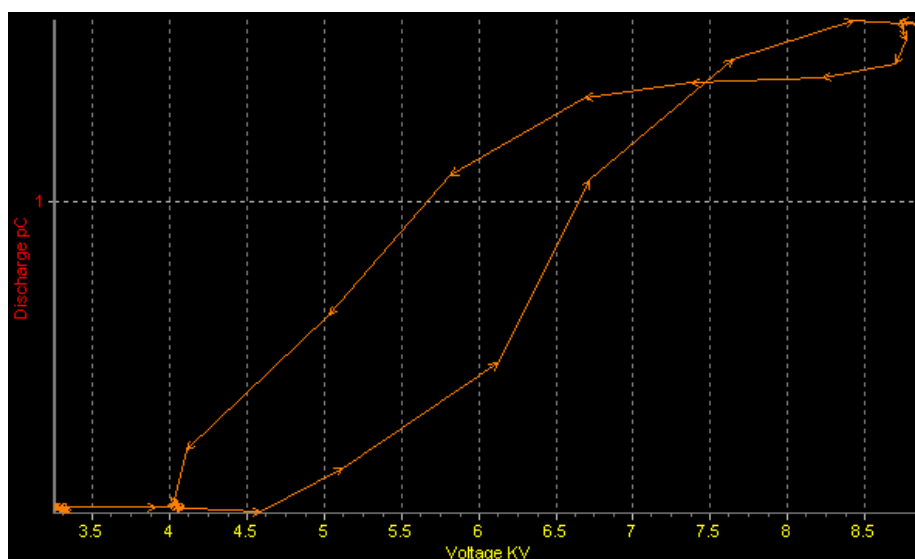
Tab. 23: Porovnání výsledků izolačních vlastností kondenzátorů měřením s můstkovým zapojením ($tg \delta$) a zapojením s injektážním kondenzátorem C_i (I_{PD})

	$U_{stř}$ [kV]	Vysokonapět'ové kondenzátory
Lepší izolační vlastnosti	4,03 kV	A3, B2, C1
	5,6 kV	C5, F3
	8,1 kV	A3, A6
Horší izolační vlastnosti	4,03 kV	C5, F3
	5,6 kV	A2, A4, A6
	8,1 kV	C5, D6, F3

Nastavení analyzačního modulu a počítačový program DDX-7000

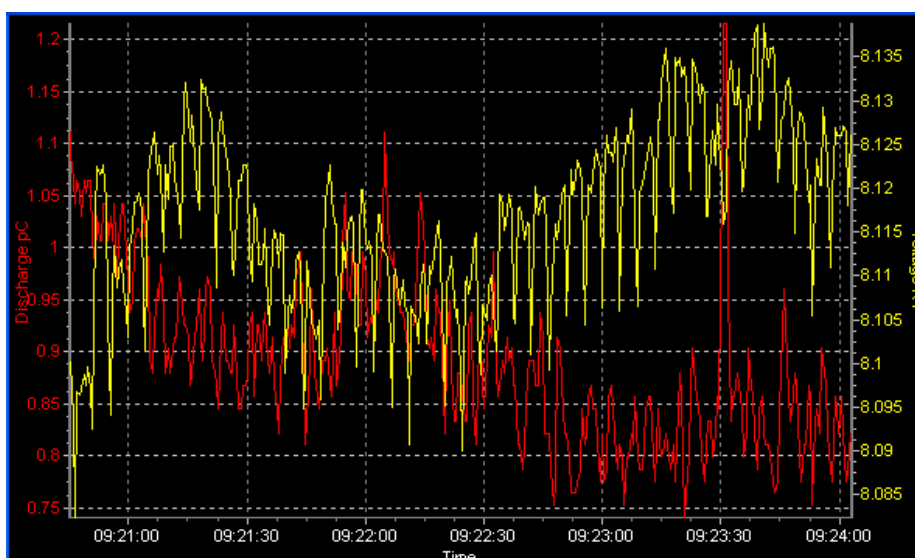
Samotný přístroj DDX-7000 má v sobě počítačový program pomocí kterého se dá nastavit různé parametry pro měření a zároveň pro zobrazení změny částečných výbojů, respektive proudových impulzů I_{PD} na střídavém napětí $U_{stř}$.

Z analyzačního modulu byly zaznamenány průběhy na **Obr. 6.54** – **Obr. 6.57**. Na **Obr. 6.54** průběh vyjadřují závislost změny proudového impulzu I_{PD} na střídavém napětí $U_{stř}$ u vysokonapět'ového kondenzátorů. Je vidět, že se zvýšením střídavého napětí $U_{stř}$ i roste proudový impulz I_{PD} do té doby, když se kondenzátor nabije, po vypnutí zdroje napětí se kondenzátor začíná vybíjet a klesat proudový impulz I_{PD} .



Obr. 6.54: Zobrazení závislosti změny I_{PD} na $U_{stř}$ u vysokonapět'ových kondenzátorů

Na **Obr. 6.55** časový průběh vyjadřují velikost a změnu proudového impulzu I_{PD} (počet impulzů) a střídavého napětí $U_{stř}$.



Obr. 6.55: Zobrazení závislosti I_{PD} a $U_{stř}$ na čase u vysokonapět'ových kondenzátorů

Na **Obr. 6.56** průběhy vyjadřují velikost a počty impulzů částečných výbojů v závislosti na fázi napájecího napětí.



Obr. 6.56: Zobrazení závislosti naměřených částečných výbojů na fázi napájecího napětí u vysokonapět'ového kondenzátoru

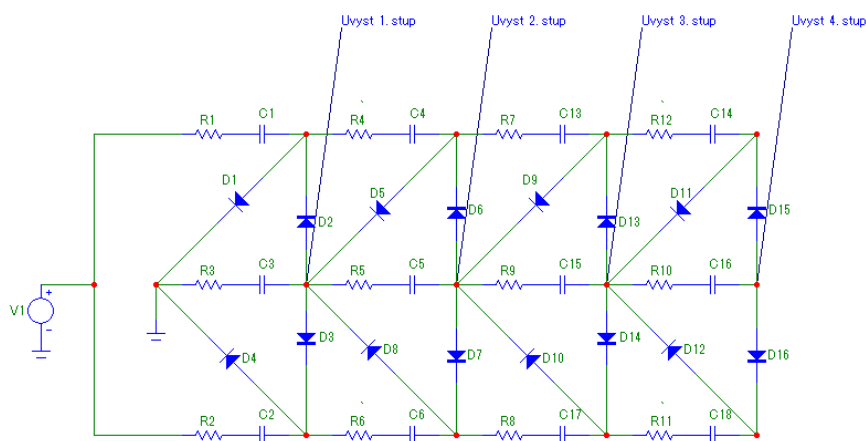
6.6. Měření účinnosti napětí na výstupech v kaskádách u napět'ového násobiče

Cílem dané úlohy je měření účinnosti napětí na výstupech kaskád v napět'ových násobičích a porovnání praktické naměřených hodnot s teoretickými hodnotami podle vztahu (4). Výsledkem je ztráty, které vyskytují v kaskádních násobičích během napět'ového namáhání.

Pro tuto úlohu byly použity další přístroje:

- kaskádní napět'ový násobič;
- vysokonapět'ová sonda s $R_{sonda}=400\text{ M}\Omega$;
- multimetr AC/DC;
- zdroj střídavého napětí $U_{max}=4\text{ kV}$.

Na **Obr. 6.57** je vidět schéma zapojení napět'ového násobiče pro tuto úlohu.



Obr. 6.57: Zapojení napět'ového násobiče

Dle **Obr. 6.57** byla připravená laboratorní úloha. Byly použité dvě desky kaskádních násobičů napětí pro tuto úlohu a počet stupňů u násobičů je $n=4$. Byly se připojené pomocí kabelů napěťový zdroj k násobiči napětí a uzemnění. Na napěťovém zdroji byly nastaveny vstupní hodnoty střídavého napětí $U_{stř}$ **Tab. 24**.

$U_{stř} [kV]$	$U_{vyst\ 1.stup} [kV]$	$U_{vyst\ 2.stup} [kV]$	$U_{vyst\ 3.stup} [kV]$	$U_{vyst\ 4.stup} [kV]$
0,50	1,38	2,70	3,80	4,55
1,00	2,72	5,40	7,80	9,50
1,50	4,08	8,05	11,70	14,27
2,00	5,56	10,97	16,00	19,60

Tab. 24: Naměřené hodnoty stejnosměrného napětí na výstupech $U_{vyst\ n.stup}$ v kaskádách

Zprvce byly nastaveny hodnoty střídavého napětí na zdroji a poté přepnutím na multimetru tlačítka AC na DC pomocí dotyku napěťové sondy do výstupu každé stupně, byly naměřeny stejnosměrné hodnoty napětí na výstupech v kaskádách násobičů.

V této úloze budeme porovnávat naměřené výsledky s teoretickými.

$$U_{teor\ n.stup} = n * 2\sqrt{2} * U_{vst} \quad (4)$$

kde n – je počet stupňů.

Pro první stupeň $n=1$, pro druhý je $n=2$, pro třetí je $n=3$ a pro čtvrtý je $n=4$.

Vypracování naměřených hodnot

Pro první stupeň byl zjištěn rozdíl praktické hodnoty oproti teoretické pro $U_{stř}=0,5\ kV$:

$$U_{teor\ 1.stup} = 1 * 2\sqrt{2} * 0,5 = 1,41\ kV$$

Podle naší **Tab. 24** $U_{vyst\ 1.stup} = 1,38\ kV$

Pro druhý stupeň je rozdíl praktické hodnoty oproti teoretické pro $U_{stř}=0,5\ kV$:

$$U_{teor\ 2.stup} = 2 * 2\sqrt{2} * 0,5 = 2,83\ kV$$

$$U_{vyst\ 2.stup} = 2,70\ kV$$

Pro třetí stupeň je rozdíl praktické hodnoty oproti teoretické pro $U_{stř}=0,5\ kV$:

$$U_{teor\ 3.stup} = 3 * 2\sqrt{2} * 0,5 = 4,24\ kV$$

$$U_{vyst\ 3.stup} = 3,80\ kV$$

Pro čtvrtý stupeň je rozdíl praktické hodnoty oproti teoretické pro $U_{stř}=0,5\ kV$:

$$U_{teor\ 4.stup} = 4 * 2\sqrt{2} * 0,5 = 5,66\ kV$$

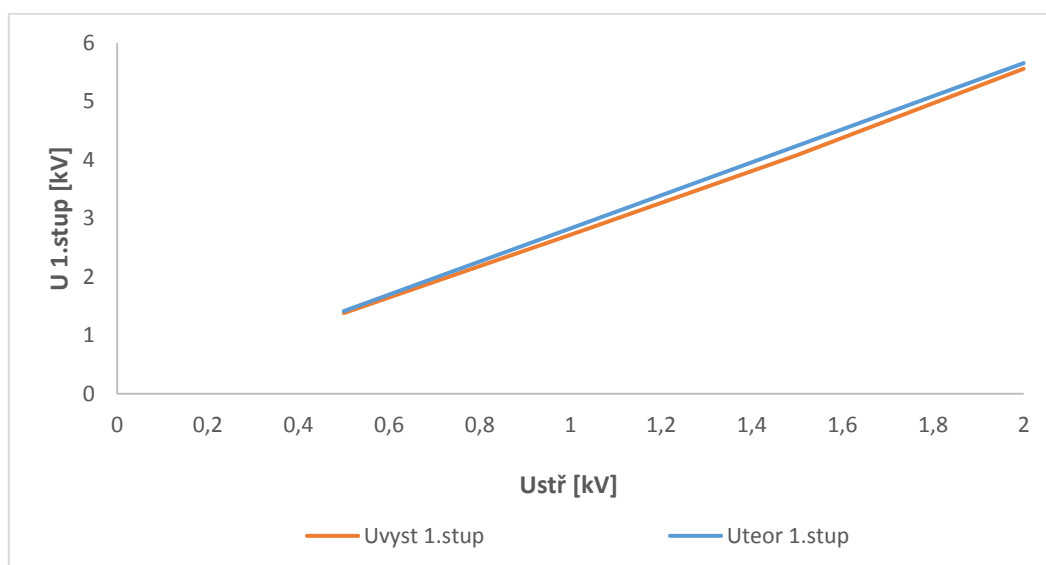
$$U_{vyst\ 4.stup} = 4,55\ kV$$

Dále v **Tab. 25** je spočítané všechny teoretické hodnoty pro každé stupeň.

$U_{stř}$ [kV]	$U_{teor\ 1.stup}$ [kV]	$U_{teor\ 2.stup}$ [kV]	$U_{teor\ 3.stup}$ [kV]	$U_{teor\ 4.stup}$ [kV]
0,50	1,41	2,83	4,24	5,66
1,00	2,83	5,66	8,49	11,31
1,50	4,24	8,49	12,73	16,97
2,00	5,66	11,31	16,97	22,63

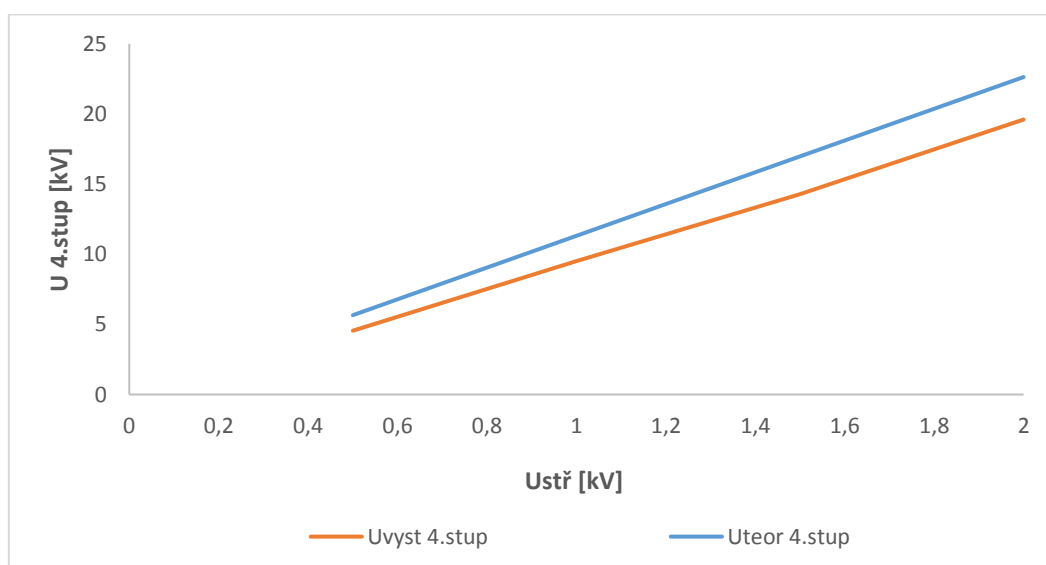
Tab. 25: Spočítané teretické hodnoty stejnosměrného napětí na výstupech $U_{vyst\ n.stup}$ v kaskádách

Na **Obr. 6.58** je vidět porovnání praktické naměřené hodnoty napětí se spočítanou teoretickou hodnotou napětí na výstupu u prvního stupně v násobíci.



Obr. 6.58: Porovnání $U_{teor\ 1.stup}$ s $U_{vyst\ 1.stup}$

Na **Obr. 6.59** je vidět porovnání praktické naměřené hodnoty napětí se spočítanou teoretickou hodnotou napětí na výstupu u čtvrtého stupně v násobíci.



Obr. 6.59: Porovnání $U_{teor\ 4.stup}$ s $U_{vyst\ 4.stup}$

Zavěr k laboratorní úloze

Z **Obr. 6.58** je možné zaznamenávat, že se vzrůstajícím napětí na výstupu prvního stupně křivky naměřených a spočítaných hodnot napětí se skoro nacházejí v jedné křívce, dá se říct, že v obvodu vyskytují malé ztráty, ale na dalším **Obr. 6.59**, je vidět, že na čtvrtém stupni se vzrůstajícím napětí křivky jsou dost rozdílné, protože s praktického hlediska dá se říct, že v obvodu vyskytují větší ztráty a ty jsou především ztráty v kondenzátorech. Při působení elektrického pole na kondenzátor se část elektrické energie přemění v teplo, kterým se dielektrikum ohřívá, to teplo způsobí růst ztrátového činitele $\tan \delta$ a tím se zničí dielektrikum kondenzátoru a zkrací jeho kvalita a životnost. Dále jsou tam ztráty v propustném a závěrném směru v diodách a ztráty, které vyskytují v sondě, která byla použita během měření napětí na výstupech ve stupních v násobících.

7. ZÁVĚR

V rámci této diplomové práce byly rozebrány teorie částečných výbojů, metody měření částečných výbojů galvanickou metodou v dielektriku vysokonapět'ových kondenzátorů a navrhnutá laboratorní úloha která nám umožní testovat a sledovat izolační stav dielektriku ve vysokonapět'ových kondenzátorů.

V kapitole 1 jsou popsány jednotlivé typy částečných výbojů, byly probrány místa výskytu částečných výbojů a ty jsou vnitřní a vnější výboje. U vnitřních a povrchových výbojů jsou uvedeny základní modely, které slouží jako pomůcka pro modelování částečných výbojů. Rozlišujeme dva modely a to se jedná o Gemant – Philippovův model (troj kapacitní) a Böningův model (pět kapacitní). Jsou tady popsány škodlivé vlivy, kterými působí částečné výboje na izolaci v kondenzátorech. Mezi tyto vlivy patří elektro – erozivní, účinky záření vynikajícího při výbojích, chemické účinky, tepelné účinky, účinky lokálního zvýšení gradientu na konci výbojového kanálu, mechanické účinky. Jsou také popsány vnější částečné výboje. Jsou popsány obrázce, které jsou zobrazovány ve formě Lissajousových obrázků. Podle fázového úhlu umístění částečných výbojů na napájecím napětí lze určit druh a místo vzniku částečných výbojů.

V kapitole 2 detekce výbojové činnosti je popsána pomocí elektrickou metodou v daném případě je to globální galvanická metoda, která pracují na principu snímání proudových impulzů vyvolaného částečnými výboji. Tam jsou uvedeny způsoby diskriminace a eliminace vnějších vlivů.

V kapitole 3 jsou uvedeny princip činnosti, využití a komponenty kaskádního napět'ového násobiče a ty jsou usměrňovací dioda a vysokonapět'ový kondenzátor. Také jsou probrány základní parametry komponent napět'ového násobiče.

V kapitole 4 jsou probrány teoretické možnosti měření kvality kondenzátorů během výdržných stejnosměrných a střídavých zkoušek kondenzátorů při 1.5 až 2 U_n . Také zde je uvedeno vlastní měření ztrátového činitele $tg \delta$ v závislostech na napětí do 1.5 U_n . Na závěr této kapitoly jsou popsány výhody a nevýhody měření kvality kondenzátorů v napět'ových násobičích. Hlavním problémem nemožnost měření vysokonapět'ového kondenzátoru je koróna a je nutně její eliminaci, která bude způsobovat špatné výsledky během samotného měření.

V kapitole 5 je popsán přístroj HIPOTRONICS DDX-8003 s pulzním diskriminačním systémem, který umožní měření výbojové činnosti. Pomocí tohoto přístroje lze eliminovat rušivé vnější vlivy, které ovlivní konečné výsledky.

V kapitole 6 je praktická část diplomové práce, kde je navržena laboratorní úloha na měření ztrátového činitele $tg \delta$ pomocí galvanické metody s můstkovým zapojením a na měření proudových impulzů I_{PD} s zapojením injektážního kondenzátoru C_I a také možnost měření účinnosti napětí na výstupech v kaskádách u napět'ového násobiče. Cílem navržené úlohy jsou způsoby jak tyto kondenzátory uchytit mezi elektrody během měření a zabránit koróně (koróna znemožňuje měření PD i $tg \delta$). Pomocí histogramů je vyhodnocení kvality kondenzátorů a zjištění v jakém stavu nachází dielektrikum vysokonapět'ových kondenzátorů. Závěr k samotné úloze je dan na konci řešených úloh (viz. str. 82, 96, 102).

Diplomová práce pomohla najít rychlou metodiku pro testování a diagnostiku izolačního stavu v dielektriku vysokonapět'ových kondenzátorů a nalezení řešení problematiky částečných výbojů, nutných opatření a postupů doprovázející samotné měření v oblasti hodnocení kvality izolačního stavu kondenzátoru galvanickou metodou pomocí můstkového zapojení a s injektážním kondenzátorem C_I . Metody umožní rychle najít nekvalitní kondenzátory a zjistit jejich životnost aby poté bylo možné používat tyto součástky v kaskádním násobiči napětí pro elektronový mikroskop s dalším zlepšením jeho spolehlivosti.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ČSN EN 60270:2001. *Technika zkoušek vysokým napětím* - Měření částečných výbojů.
- [2] Mentlík K, Václav, et al. *Diagnostika elektrických zařízení*. Praha: BEN - Technická literatura, 2008, 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [3] Záliš K. *Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů*. 1. vyd. Praha 2005. 139 s. ISBN 80-200-1358-X.
- [4] Vlášek V. *Měření částečných výbojů v průmyslové výrobě*. Plzeň: 2015. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická.
- [5] Havlíček, T. *Částečné výboje v elektronických zařízeních pracujících na vyšších kmitočtech*. Brno: 2009. Doktorská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [6] Macek V. *Částečné výboje*. Brno 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [7] Mentlík K, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 235 s. ISBN 80-7300-189-6.
- [8] Krbal M. *Technika vysokých napětí*. FEKT VUT v Brně, 112 s.
- [9] Haefely Hipotronics DDX 7000 and 8003 Digital Partial Discharge Detectors
- [10] Hidler A. David *Partial discharge measurement* Brno University of Technology, 2014
- [11] Internetové stránky user.unob.cz/zaplatilek/Obecne/Skripta.../Část1.doc
- [12] Křivánek V. *Detekce samo regenerace foliového kondenzátoru*. Diplomová práce. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická.
- [13] Internetové stránky <http://jjohnyk.sweb.cz/elektronika/01.htm>
- [14] Frohm, M. *Elektronika: polovodičové součástky a základní zapojení*. 1. české vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 479 s. ISBN 80-730-0123-3.
- [15] Katalog GM Electronic. *Elektronické součástky*, 2013.
- [16] Kazelle, J., Liedermann, K., Jiráček, J., Havlíček, S., Vaněk, J., Rozsivalová, Z., Sedlaříková, M., *Elektrotechnické materiály a výrobní procesy*, Brno: Vysoké učení technické. 127 stran.
- [17] Plaček I. *Diagnostika kabelů vysokého napětí*. Bakalářská práce. Plzeň: 2012. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická.
- [18] High – Precision C, L and tg δ Measuring Bridge Tettex 2840

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Možnosti vzniku částečných výbojů [5].....	12
Obr. 1.2: Gemant – Philippovův model [5].....	13
Obr. 1.3: Časový průběh napětí a proudů Gemant – Philippovova modelu [6].....	14
Obr. 1.4: Böningův model [7].....	15
Obr. 1.5: Průběh napětí při částečných výbojích na Böningově modelu [4].....	15
Obr. 1.6: Elektrický stromeček po průrazu izolace [6].....	17
Obr. 1.7: Elektroodové uspořádání vnějšího částečného výboje [3].....	18
Obr. 1.8: Náhradní schéma pro vnější částečný výboj [3].....	18
Obr. 1.9: Časový průběh napětí při vnějším výboji [5].....	19
Obr. 1.10: Typy obrázků částečných výbojů [3].....	21
Obr. 2.1: Schéma zapojení galvanické metody pro měření částečných výbojů [8].....	23
Obr. 2.2: Schéma zapojení galvanické metody pro měření částečných výbojů s injektážním kondenzátorem [8].....	24
Obr. 2.3: Grafické existenci signálu vnějšího vlivu [10].....	25
Obr. 2.4: Diferenciálního můstkového zapojení systému pro měření částečných výbojů [8].....	26
Obr. 2.5: Schématické zapojení systému pro měření částečných výbojů s externí anténou [9].....	26
Obr. 3.1: Schéma dvoucestného kaskádního násobiče napětí.....	28
Obr. 3.2: Příklady realizace násobičů napětí v běžných spotřebičích [8].....	30
Obr. 3.3: Fóliový vysokonapěťový kondenzátor s vlastními parametry.....	32
Obr. 3.4: Svitkový kondenzátor [12].....	32
Obr. 3.5: Náhradní schéma reálného svitkového kondenzátoru [12].....	32
Obr. 3.6: Řez pokovenou polypropylenovou fólií [12].....	33
Obr. 3.7: Usměrňovací dioda napěťového násobiče.....	34
Obr. 4.1: Časový průběh testovacího napětí u krátkodobé výdržné zkoušky střídavým napětím průmyslového kmitočtu [8].....	36
Obr. 4.2: Princip měření ztrátového činitele [17].....	39
Obr. 5.1: Nastavení PDS	42
Obr. 5.2: Okenko nastavení Možnosti	42
Obr. 5.3: Okenko nastavení Časové periody	44
Obr. 5.4: Okenko nastavení Jiných možností	46
Obr. 6.1: Diferenciální můstkové zapojení systému pro měření částečných výbojů [8].....	48
Obr. 6.2: Kulové elektrody.....	49
Obr. 6.3: Vysokonapěťový kondenzátor, kulové elektrody a svislý způsob uchopení kondenzátoru mezi kulovými elektrodami v měřeném objektu.....	50
Obr. 6.4: Tettex 2840.....	52

Obr. 6.5: Schéma zapojení Tettex 2840 (vepředu) a dotyková obrazovka (vzadu).....	53
Obr. 6.6: Analizační grafický modul Tettex 2840.....	54
Obr. 6.7: Schéma zapojení galvanické metody pro měření částečných výbojů s injektážním kondenzátorem [8].....	55
Obr. 6.8: Vysokonapěťový kondenzátor, kulové elektrody a svislý způsob uchopení kondenzátoru mezi kulovými elektrodami v měřeném objektu.....	56
Obr. 6.9: Úvodní obrazovka programu DDX-7000.....	59
Obr. 6.10: Nastavení zesilovače.....	61
Obr. 6.11: Nastavení zobrazení průběhu a hradel.....	62
Obr. 6.12: Sinusový způsob zobrazení průběhu.....	62
Obr. 6.13: Výběr analyzačního modulu.....	63
Obr. 6.14: Závislost $tg \delta$ na $U_{stř}$ u kondenzátoru A1.....	65
Obr. 6.15: Závislost C_x na $U_{stř}$ u kondenzátoru A1.....	65
Obr. 6.16: Závislost $tg \delta$ na $U_{stř}$ u kondenzátoru A2.....	66
Obr. 6.17: Závislost C_x na $U_{stř}$ u kondenzátoru A2.....	67
Obr. 6.18: Závislost $tg \delta$ na $U_{stř}$ u kondenzátorů A1 – A6.....	69
Obr. 6.19: Závislost C_x na $U_{stř}$ u kondenzátorů A1 – A6.....	69
Obr. 6.20: Závislost $tg \delta$ na $U_{stř}$ u kondenzátorů B1 – B6.....	71
Obr. 6.21: Závislost C_x na $U_{stř}$ u kondenzátorů B1 – B6.....	71
Obr. 6.22: Závislost $tg \delta$ na $U_{stř}$ u kondenzátoru B5.....	72
Obr. 6.23: Závislost C_x na $U_{stř}$ u kondenzátoru B5.....	72
Obr. 6.24: Závislost $tg \delta$ na $U_{stř}$ u kondenzátorů C1 – C6.....	75
Obr. 6.25: Závislost C_x na $U_{stř}$ u kondenzátorů C1 – C6.....	75
Obr. 6.26: Závislost $tg \delta$ na $U_{stř}$ u kondenzátorů D1 – D6.....	77
Obr. 6.27: Závislost C_x na $U_{stř}$ u kondenzátorů D1 – D6.....	77
Obr. 6.28: Závislost $tg \delta$ na $U_{stř}$ u kondenzátorů E1 – E6.....	79
Obr. 6.29: Závislost C_x na $U_{stř}$ u kondenzátorů E1 – E6.....	79
Obr. 6.30: Závislost $tg \delta$ na $U_{stř}$ u kondenzátorů F1 – F6.....	81
Obr. 6.31: Závislost C_x na $U_{stř}$ u kondenzátorů F1 – F6.....	81
Obr. 6.32: Histogram změny ztrátových činitelů $tg \delta$ u naměřených kondenzátorů při $U_{stř}=4,03$ kV.....	82
Obr. 6.33: Histogram změny ztrátových činitelů $tg \delta$ u neměřených kondenzátorů při $U_{stř}=5,6$ kV.....	82
Obr. 6.34: Histogram změny ztrátových činitelů $tg \delta$ u naměřených kondenzátorů při $U_{stř}=8,1$ kV.....	83
Obr. 6.35: Nastavení měření.....	85

Obr. 6.36: Kalibrace měřicího systému.....	85
Obr. 6.37: Sekce měření po kalibraci.....	86
Obr. 6.38: Závislost I_{PD} na $U_{stř}$ u kondenzátoru A4.....	87
Obr. 6.39: Závislost I_{PD} na $U_{stř}$ u kondenzátoru A5.....	87
Obr. 6.40: Závislost I_{PD} na $U_{stř}$ u kondenzátorů A3 – A6.....	88
Obr. 6.42: Závislost I_{PD} na $U_{stř}$ u kondenzátoru B4.....	89
Obr. 6.43: Závislost I_{PD} na $U_{stř}$ u kondenzátorů B1 – B6.....	89
Obr. 6.44: Závislost I_{PD} na $U_{stř}$ u kondenzátoru C6.....	90
Obr. 6.45: Závislost I_{PD} na $U_{stř}$ u kondenzátorů C1 – C6.....	91
Obr. 6.46: Závislost I_{PD} na $U_{stř}$ u kondenzátoru D4.....	92
Obr. 6.47: Závislost I_{PD} na $U_{stř}$ u kondenzátorů D1 – D6.....	92
Obr. 6.48: Závislost I_{PD} na $U_{stř}$ u kondenzátoru E5.....	93
Obr. 6.49: Závislost I_{PD} na $U_{stř}$ u kondenzátorů E1 – E6.....	94
Obr. 6.50: Závislost I_{PD} na $U_{stř}$ u kondenzátorů F1 – F6.....	95
Obr. 6.51: Histogram změny proudových impulzů I_{PD} u naměřených kondenzátorů při $U_{stř}=4,03$ kV.....	96
Obr. 6.52: Histogram změny proudových impulzů I_{PD} u naměřených kondenzátorů při $U_{stř}=5,6$ kV.....	96
Obr. 6.53: Histogram změny proudových impulzů I_{PD} u naměřených kondenzátorů při $U_{stř}=8,1$ kV.....	97
Obr. 6.54: Zobrazení závislosti změny I_{PD} na $U_{stř}$ u vysokonapět'ových kondenzátorů.....	98
Obr. 6.55: Zobrazení závislosti I_{PD} a $U_{stř}$ na čase u vysokonapět'ových kondenzátorů.....	98
Obr. 6.56: Zobrazení závislosti naměřených částečných výbojů na fázi napájecího napětí u vysokonapět'ového kondenzátorů.....	99
Obr. 6.57: Zapojení napět'ového násobiče.....	99
Obr. 6.58: Porovnání $U_{teor\ 1.stup}$ s $U_{vyst\ 1.stup}$	101
Obr. 6.59: Porovnání $U_{teor\ 4.stup}$ s $U_{vyst\ 4.stup}$	101

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Parametry fóliového vysokonapěťového kondenzátoru.....	33
Tab. 2: Parametry usměrňovací diody.....	34
Tab. 3: Normalizované krátkodobé výdržné napětí síťového kmity [8].....	36
Tab. 4: Nastavení PDS v okenku Možnosti	43
Tab. 5: Parametry nastavení Časové periody	45
Tab. 6: Technické parametry přístroje Tettex 2840.....	52
Tab. 7: Technické parametry přístroje DDX-7000.....	58
Tab. 8: Popis programu DDX-7000.....	60
Tab. 9: Naměřené hodnoty $tg \delta$ a C_x na $U_{stř}$ u kondenzátoru A1.....	64
Tab. 10: Naměřené hodnoty ztrátového činitele $tg \delta$ a kapacity C_x pro každý kondenzátor na desce A.....	68
Tab. 11: Naměřené hodnoty ztrátového činitele $tg \delta$ a kapacity C_x pro každý kondenzátor na desce B.....	70
Tab. 12: Naměřené hodnoty $tg \delta$ a C_x na $U_{stř}$ u kondenzátoru B5.....	71
Tab. 13: Naměřené hodnoty ztrátového činitele $tg \delta$ a kapacity C_x pro každý kondenzátor na desce C.....	74
Tab. 14: Naměřené hodnoty ztrátového činitele $tg \delta$ a kapacity C_x pro každý kondenzátor na desce D.....	76
Tab. 15: Naměřené hodnoty ztrátového činitele $tg \delta$ a kapacity C_x pro každý kondenzátor na desce E.....	78
Tab. 16: Naměřené hodnoty ztrátového činitele $tg \delta$ a kapacity C_x pro každý kondenzátor na desce F.....	80
Tab. 17: Naměřené hodnoty proudových impulzů I_{PD} pro každý kondenzátor na desce A.....	86
Tab. 18: Naměřené hodnoty proudových impulzů I_{PD} pro každý kondenzátor na desce B.....	88
Tab. 19: Naměřené hodnoty proudových impulzů I_{PD} pro každý kondenzátor na desce C.....	90
Tab. 20: Naměřené hodnoty proudových impulzů I_{PD} pro každý kondenzátor na desce D.....	91
Tab. 21: Naměřené hodnoty proudových impulzů I_{PD} pro každý kondenzátor na desce E.....	93
Tab. 22: Naměřené hodnoty proudových impulzů I_{PD} pro každý kondenzátor na desce F.....	94
Tab. 23: Porovnání výsledků izolačních vlastností kondenzátorů měřením můstkovým zapojením ($tg \delta$) a zapojením s injektážním kondenzátorem C_i (I_{PD}).....	97
Tab. 24: Naměřené hodnoty stejnosměrného napětí na výstupech $U_{vyst\ n.stup}$ v kaskádách.....	100
Tab. 25: Spočítané teoretické hodnoty stejnosměrného napětí na výstupech $U_{vyst\ n.stup}$ v kaskádách.....	101